



Integrierte Bewertung von Investitions- und Instand- haltungsstrategien für die Bahnsicherungstechnik

Katja Gutsche

Berichte aus dem DLR-Institut
für Verkehrssystemtechnik

Band 9



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Integrierte Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien für die Bahnsicherungstechnik

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung der Würde
einer Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von: **Katja Gutsche**

aus (Geburtsort): Halle/ Saale

eingereicht am: 13. November 2009

mündliche Prüfung am: 16. Dezember 2009

Referenten: Professor Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Professor Dr.-Ing. Klaus Jobmann

Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik

Band 9

Integrierte Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien für die Bahnsicherungstechnik

Katja Gutsche

Herausgeber:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Verkehrssystemtechnik
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

ISSN 1866-721X

DLR-TS 1.9

Braunschweig, im Februar 2010

Institutsdirektor:
Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Verfasserin:
Katja Gutsche

Vorwort des Herausgebers

Liebe Leserinnen und Leser,

In Ihren Händen halten Sie einen Band unserer Buchreihe „Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik“. In dieser Reihe veröffentlichen wir spannende, wissenschaftliche Themen aus dem Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und aus seinem Umfeld. Einen Teil der Auflage stellen wir Bibliotheken und Fachbibliotheken für ihren Buchbestand zur Verfügung. Herausragende wissenschaftliche Arbeiten und Dissertationen finden hier ebenso Platz wie Projektberichte und Beiträge zu Tagungen in unserem Hause von verschiedenen Referenten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik.

Mit dieser Veröffentlichungsreihe verfolgen wir das Ziel, einen weiteren Zugang zu wissenschaftlichen Arbeiten und Ergebnissen zu ermöglichen. Wir nutzen die Reihe auch als praktische Nachwuchsförderung durch die Publikation der wissenschaftlichen Ergebnisse von Dissertationen unserer Mitarbeiter und auch externer Doktoranden. Veröffentlichungen sind wichtige Meilensteine auf dem akademischen Berufsweg. Mit der Reihe „Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik“ erweitern wir das Spektrum der möglichen Publikationen um einen Baustein. Darüber hinaus verstehen wir die Kommunikation unserer Forschungsthemen als Beitrag zur nationalen und internationalen Forschungslandschaft auf den Gebieten Automotive, Bahnsysteme und Verkehrsmanagement.

Im vorliegenden Band wird ein Bewertungsverfahren für Investitionen in der Bahnsicherungstechnik vorgestellt. Dazu fließen zum einen quantitative und aus Eisenbahnbetriebssimulation gewonnene qualitative Erfolgsgrößen in die Bewertung ein. Zum anderen wird der Einfluss alternativer Instandhaltungsstrategien auf die Lebenszykluskosten und damit auf die Attraktivität einzelner Investitionsalternativen separat mittels dynamischer Zustandssimulation analysiert. Damit stellt dieses Verfahren eine deutliche Weiterentwicklung zu bestehenden, auf dem Lebenszyklusansatz basierenden Bewertungsverfahren dar. Die Qualität der Entscheidungsgrundlage wird wesentlich verbessert. Das Verfahren ist ein Instrument, das Eisenbahninfrastrukturunternehmen und öffentlichen Institutionen umsichtige Investitionsentscheidungen in langlebige Bahntechnik erleichtert – und damit zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit des Verkehrsträgers Schiene beiträgt.

Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Vorwort der Autorin

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. in Braunschweig.

Ich danke in erster Linie dem Institutsleiter Herrn Professor Dr.-Ing. Karsten Lemmer als meinem Doktorvater für die wohlwollende Unterstützung meiner Arbeit, mit der er einen zügigen Abschluss der Arbeit ermöglichte. Der mir durch ihn gebotene wissenschaftliche Freiraum schaffte die Grundlage für den erfolgreichen Abschluss der vorliegenden Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Jobmann vom Institut für Kommunikationstechnik der Universität Hannover danke ich für die Übernahme des Koreferats. Durch seine kritische Auseinandersetzung mit der Arbeit und den in gemeinsamen Diskussionen erarbeiteten Ideen hat er diese Arbeit auf besondere Weise bereichert.

Mein Dank gilt außerdem Herrn Professor Dr.-Ing. Dr. h.c. Eckehard Schnieder, Leiter des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der TU Braunschweig, für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Den Herren Manfred Brauer und Torsten Woicke von der DB Netz AG, Regionalbereich Ost danke ich für ihre bereitwillige inhaltliche Zusammenarbeit. Sie verschafften mir tiefgehende Einblicke in die Entstörungspraxis im Netz der DB und ermöglichten mir so die Übertragung der Theorie in die Praxis.

Des Weiteren möchte ich allen Kollegen und Studenten danken, die in den letzten Jahren zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Insbesondere gilt mein Dank den Kollegen Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Benedikt Scheier und Dipl.-Ing.-Inf. Thomas Böhm. Beide haben mich mit ihren Spezialkenntnissen in entscheidenden Punkten inhaltlich unterstützt.

Auf ganz besondere Weise möchte ich meiner Familie danken. Meinen Eltern danke ich für ein vorgelebtes Wertesystem, welches den Nährboden für diese Arbeit schaffte. Meinem Ehemann Thomas bin ich für seine stete Unterstützung im Verlauf meines Vorhabens dankbar. Seine objektive Sicht der Dinge war ein wichtiger Baustein in Entstehung und erfolgreichem Abschluss der Arbeit. Bei unserem Sohn Noah möchte ich mich für seinen gesunden Schlaf bedanken, mit dem er mir wichtige Bearbeitungszeit geschenkt hat.

Hannover, im Dezember 2009

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-------------|
| Vorwort des Herausgebers..... | iii |
| Vorwort der Autorin | v |
| Inhaltsverzeichnis..... | vii |
| Abbildungsverzeichnis..... | xi |
| Tabellenverzeichnis..... | xiii |
| Kurzfassung..... | xv |
| Abstract..... | xvii |
| 1 Einführung | 1 |
| 1.1 Ausgangssituation und Zielstellung | 1 |
| 1.2 Inhalt und wissenschaftlich Einordnung der Arbeit | 4 |
| 1.3 Aufbau der Arbeit..... | 7 |
| 2 Eisenbahnsicherungstechnik | 9 |
| 2.1 Struktur..... | 9 |
| 2.2 Fokus der Betrachtung..... | 12 |
| 3 Investitionsstrategien | 13 |
| 3.1 Investition und Investitionsstrategie..... | 13 |
| 3.1.1 Analyse der Lebenszykluskosten | 14 |
| 3.1.2 Nutzenbewertung | 21 |
| 3.1.3 Zusammenführende Bewertung | 23 |
| 3.2 Eisenbahnbetriebssimulation zur Wirtschaftlichkeitsbewertung..... | 26 |
| 3.2.1 Bewertungskriterien | 27 |
| 3.2.2 Eisenbahnbetriebssimulation | 28 |
| 3.2.3 Instrument zur Wirtschaftlichkeitsbewertung | 29 |
| 4 Instandhaltungsstrategien..... | 33 |
| 4.1 Zuverlässigkeitstheorie | 33 |
| 4.2 Abnutzungsvorrat..... | 36 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.3 | Instandhaltungskosten..... | 39 |
| 4.4 | Instandhaltungsstrategien..... | 41 |
| 4.4.1 | Zeitabhängige Instandhaltung | 44 |
| 4.4.2 | Zustandsorientierte Instandhaltung | 45 |
| 4.4.3 | Ausfallorientierte Instandhaltung..... | 48 |
| 4.5 | Strategieauswahl | 51 |
| 4.6 | Instandhaltung von Bahnsicherungstechnik..... | 53 |
| 4.7 | Modellierung und Bewertung von Instandhaltungsstrategien | 56 |
| 4.7.1 | Ziel der Modellierung | 57 |
| 4.7.2 | Modellbausteine | 57 |
| 4.7.3 | Modellaufbau und Bewertung..... | 59 |
| 5 | Integrierte Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien..... | 67 |
| 5.1 | Idee..... | 67 |
| 5.2 | Thesen | 70 |
| 5.3 | Vorgehensweise | 70 |
| 5.3.1 | Investitionsstrategiebewertung | 74 |
| 5.3.2 | Instandhaltungsstrategiebewertung | 76 |
| 5.4 | Anwendungsleitfaden | 82 |
| 6 | Fallstudie | 85 |
| 6.1 | Der Untersuchungsraum | 85 |
| 6.2 | Investitionsstrategiebewertung | 87 |
| 6.2.1 | Randparameter | 87 |
| 6.2.2 | Identifikation von Investitionsstrategien | 89 |
| 6.2.3 | Simulation & Bewertung | 91 |
| 6.3 | Instandhaltungsstrategiebewertung | 106 |
| 6.3.1 | Das System Eisenbahnweiche | 107 |
| 6.3.2 | Definition von Instandhaltungsstrategien..... | 114 |
| 6.3.3 | Simulation und Bewertung..... | 116 |

| | |
|--|------------|
| 6.4 Entscheidungsgrundlage | 123 |
| 7 Zusammenfassung und Ausblick..... | 125 |
| 7.1 Zusammenfassung..... | 125 |
| 7.2 Ausblick | 126 |
| Abkürzungsverzeichnis..... | 129 |
| Verzeichnis Formelzeichen | 131 |
| Anhang | 133 |
| Literaturverzeichnis | 151 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Jährlicher Gesamtaufwand für Bahnsicherungstechnik in € / Gleiskilometer [Zsc06]; [UIC02b] | 2 |
| Abbildung 2: Zusammenhang Investitions- und Instandhaltungsstrategie..... | 3 |
| Abbildung 3: Wissenschaftliche Einordnung dieser Arbeit..... | 6 |
| Abbildung 4: Struktur der Arbeit..... | 8 |
| Abbildung 5: physische Strukturierung der streckenseitigen Eisenbahnsicherungstechnik..... | 10 |
| Abbildung 6: „Kosteneisberg“ ([Bla08], S. 6)..... | 15 |
| Abbildung 7: Lebenszyklus von Bahnsicherungstechnik | 15 |
| Abbildung 8: Festlegung vs. Entstehung der LCC ([Sch05], S.44) | 17 |
| Abbildung 9: Strukturierung LCC | 19 |
| Abbildung 10: 2-Stufen-Verfahren zur EWA..... | 23 |
| Abbildung 11: Zeitwert versus Barwert..... | 24 |
| Abbildung 12: Instandhaltung als Funktion von Schädigung..... | 37 |
| Abbildung 13: Zeitlicher Verlauf des Abnutzungsvorrats (in Anlehnung an [DIN03]) | 38 |
| Abbildung 14: Messwertverläufe zur Zustandsbeschreibung | 39 |
| Abbildung 15: Instandhaltungsstrategie – Zusammenhang zwischen Zustand, Maßnahmen und Kosten | 41 |
| Abbildung 16: Strukturierung Instandhaltung (vgl. [DIN03])..... | 43 |
| Abbildung 17: Zusammenhang zwischen präventiven und korrektiven Instandhaltungsmaßnahmen (in Anlehnung an [Kel97], S. 98) | 44 |
| Abbildung 18: Produktivitätsverlust durch zeitabhängige Instandhaltung (in Anlehnung an [Zwa07]) | 45 |
| Abbildung 19: Methoden der Zustandserfassung | 48 |
| Abbildung 20: Instandhaltungsstrategieauswahl | 52 |
| Abbildung 21: Modellbausteine | 59 |
| Abbildung 22: Ursache-Wirkungsbeziehungen Instandhaltung | 61 |
| Abbildung 23: Aufbau und Ablauf der Instandhaltungsstrategiemodellierung und -bewertung..... | 64 |
| Abbildung 24: Anschaffungsausgaben versus Betreiber-LCC | 68 |
| Abbildung 25: Integrierte Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien .. | 69 |
| Abbildung 26: Ablaufdiagramm für die integrierte Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien..... | 72 |
| Abbildung 27: Ablauf Bewertung Investitionsstrategien..... | 75 |
| Abbildung 28: Simulationsablauf bei der Bewertung von Instandhaltungsstrategien auf Systemebene | 77 |
| Abbildung 29: Schrittfolge bei Durchführung einer integrierten Bewertung | 83 |
| Abbildung 30: Beispielstrecke | 86 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 31: Schrittfolge Investitionsstrategiebewertung - angewandt..... | 92 |
| Abbildung 32: Kumulierte LCC für Beispielstrecke ohne (oben) und mit (unten) Diskontierung | 95 |
| Abbildung 33: Nutzwertportfolio Fallstudie | 104 |
| Abbildung 34: LCC je Nutzenpunkt Fallstudie | 105 |
| Abbildung 35: Struktur Abschnitt 6.3.1..... | 107 |
| Abbildung 36: Weichenantrieb S700K [Sie08] | 108 |
| Abbildung 37: System Weiche (in Anlehnung an [BH86], S. 10)..... | 108 |
| Abbildung 38: Einflussgrößen auf den Systemzustand..... | 109 |
| Abbildung 39: Wirkleistungskurve eines Weichenantriebsmotors [Sto02]..... | 110 |
| Abbildung 40: Grafische Darstellung der Grenzwertbereiche für das Zustandskriterium Zungenschwergang [Sie98b]..... | 111 |
| Abbildung 41: Zustandsgleichungen dreier Weichen | 113 |
| Abbildung 42: Schrittfolge Instandhaltungsstrategiebewertung - angewandt | 116 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Tabelle 1: Übersicht Grundstrategien der Instandhaltung..... | 50 |
| Tabelle 2: Investitionsalternativen Fallbeispiel [BSJ08]..... | 98 |
| Tabelle 3: Auswahl monetär nicht bewertbarer Nutzenaspekte..... | 97 |
| Tabelle 4: Qualitative Nutzenbewertung [BSJ08]..... | 100 |
| Tabelle 5: Bewertungsergebnisse Fallstudie – Teil I..... | 103 |
| Tabelle 6: Bewertungsergebnisse Fallstudie – Teil I..... | 103 |
| Tabelle 7: Parameter für die Analyse der Instandhaltungsstrategien Weichenantrieb .. | 118 |
| Tabelle 8: Ergebnisse Strategiebewertung | 122 |

Kurzfassung

Die Akteure des Schienenverkehrs erleben aktuell einen zunehmenden Wettbewerb zwischen den Verkehrsmoden Straßen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr. Um sich in diesem unternehmerischen Umfeld langfristig behaupten zu können, verlangt es nach betriebswirtschaftlich nachhaltigen Entscheidungen.

Der Gesamterfolg und damit die Wettbewerbsfähigkeit des Verkehrssystems Schiene wird wesentlich durch Art und Umfang der im Betrieb befindlichen Anlagen bestimmt. Entsprechend sind Investitionsentscheidungen in langlebige Bahntechnik umsichtig zu treffen. Investitions- und Instandhaltungsstrategie sind aufgrund ihrer Abhängigkeiten zueinander und wegen ihrer betriebswirtschaftlichen Relevanz als Kostentreiber gemeinschaftlich zu bewerten. Denn nur so gelingt es, die verfügbaren Ressourcen bestmöglich einzusetzen. Um dieses mehrdimensionale Entscheidungsumfeld umfassend abzubilden, muss ein den Entscheidungsprozess unterstützendes Instrumentarium vorliegen.

Vor diesem Hintergrund wurde ein Bewertungsverfahren für Eisenbahninfrastrukturunternehmen entwickelt, mit dessen Hilfe das Entscheidungsproblem bei Investitionen in Bahnsicherungstechnik strukturiert aufgearbeitet und transparent gemacht wird. Dabei erfolgt, entgegen der bisherigen Praxis, eine zusammenhängende Betrachtung von Anschaffungs-, Betriebs- und Instandhaltungsaufwendungen. Diese Lebenszyklusbetrachtung schließt eine detaillierte Analyse und Bewertung der in Abhängigkeit von den Investitionsalternativen möglichen Instandhaltungsstrategien ein.

Die vorliegende Arbeit umfasst

- die Vorgehensweise bei der Aufstellung eines Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstruments unter Berücksichtigung von Lebenszykluskosten und -nutzen,
- die Möglichkeiten der Verwertung von Informationen aus Eisenbahnbetriebssimulationen für Investitionsstrategieentscheidungen,
- die Bedeutung der Instandhaltung im Lebenszyklus von Eisenbahninfrastrukturanlagen sowie prinzipielle Instandhaltungsstrategien,
- die Vorgehensweise bei der Instandhaltungsstrategiefindung und
- die Instandhaltungsstrategiemodellierung aufbauend auf der Zustandsbeschreibung der Infrastrukturelemente.

Davon ausgehend werden dem Leser die Potentiale und die Vorgehensweise einer integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien erläutert.

Die Anwendbarkeit des Verfahrens der integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien wird abschließend anhand eines Fallbeispiels verdeutlicht. Durch die Wahl eines Nebenstreckenabschnitts in Norddeutschland wird gleichzeitig das aktuelle Thema der

Weiterbewirtschaftung versus Stilllegung von Regionalstrecken adressiert. Das Verfahren stellt heraus, welchen Einfluss alternative Varianten der Streckenausrüstung (Bahnsicherungstechnik) und die Anwendung zustandsorientierter Instandhaltung auf die Wirtschaftlichkeit des Streckenbetriebs nehmen.

Im Ergebnis beschreibt die vorliegende Arbeit die Möglichkeiten des Einsatzes von Eisenbahnbetriebssimulationen, die Dringlichkeit von Nutzwertbetrachtungen sowie den hohen Erkenntnisgewinn durch die Instandhaltungsstrategiemodellierung im Investitionsentscheidungsprozess. Die Arbeit unterstreicht somit die Notwendigkeit umfassender Investitionsbetrachtungen für Schieneninfrastruktur und damit für Bahnsicherungstechnik, insbesondere vor dem Hintergrund aktueller Entwicklungen auf dem Verkehrsmarkt. Das Verfahren der integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien wird die Verantwortlichen dabei unterstützen.

Abstract

The actors in the railway domain are experiencing an increasing competition between the traffic modes street, rail, air and shipping traffic. This asks for sustainable economical decisions.

The economical success and therefore the competitiveness of the rail traffic system are mainly determined by the kind and number of the infrastructure elements in service. Therefore careful investment decisions in long lasting rail infrastructure are necessary. Because of the interaction between investment and maintenance strategy and their economical impact as cost drivers they both have to be determined conjointly. Because only that way the best use of available resources can be realised. This makes the decision multidimensional, which asks for a supporting evaluation instrument.

This awareness set the starting point for the development of a support system for rail infrastructure managers with which the investment decision becomes well structured and transparent. Contrary to the common decision making investment, service and maintenance expenses are regarded conjointly within this tool. This life-cycle examination includes a detailed evaluation of possible maintenance strategies for the investment alternatives.

This paper at hand includes the description of

- how to build up a economy evaluation tool under consideration of life cycle costs and benefits,
- the potentials of using information from railway operation simulations for investment decisions,
- the economical relevance of maintenance throughout the life cycle of railway infrastructure elements and possible maintenance strategies,
- how to define maintenance strategies conceivable for the investment alternative and
- the modelling of maintenance strategies based on wear-out functions.

Based on these aspects the potentials and the approach of an integrative evaluation of investment and maintenance strategies are illustrated.

The applicability of the method of an integrative evaluation of investment and maintenance strategy is illustrated through a case study. For this a second railway line located in northern Germany is chosen, which also allows addressing the current problem of continuing the operation versus closure of regional lines. The procedure points out the influence of alternative line equipment scenarios (train control infrastructure) and the implementation of condition-based maintenance on the efficiency of the line operation.

To sum up, the paper at hand describes the opportunities given through the use of train operation simulation, the necessity of benefit evaluations and the gain of knowledge through the modelling of maintenance strategies when making investment decisions. The results un-

derline the need for broad investment examinations for railway infrastructure and in particular for railway control systems, especially considering the current situation on the traffic market. The persons in charge will be supported herein through the use of the integrative evaluation procedure of investment and maintenance strategy.

1 Einführung

1.1 Ausgangssituation und Zielstellung

Derzeit ist der Verkehrsmarkt sowohl durch einen steigenden inter- und intramodalen Wettbewerb als auch eine steigende Nachfrage nach Transportleistungen gekennzeichnet [Eur01] [DB08]. Dabei resultiert ein zunehmender intramodaler Wettbewerb aus der Umsetzung der EU-Richtlinie 2001/12/EG sowie des Gesetzgebungsvorschlags KOM 2004/139¹. Für den Schienenpersonennahverkehr gründet er sich zudem auf die 1996 eingeführte Regionalisierung [Tro06].

Inwieweit der Verkehrsträger Schiene von einer erhöhten Verkehrsnachfrage profitieren und sich im Wettbewerb behaupten kann, bestimmt sich vor allem durch ein attraktives Preis-Leistungsverhältnis. Dies wird durch hohe Transportqualität bei niedrigen Kosten geschaffen. Sowohl die Kosten als auch die Qualität bedingen sich durch die Wahl der Investitionsstrategie. Die Höhe der Kosten für die Schieneninfrastruktur stellt dabei einen wichtigen Parameter für den Geschäftserfolg von Eisenbahnen dar [Sta01]. Ein Kernelement der Schieneninfrastruktur bildet die Bahnsicherungstechnik. Ihre Funktionsfähigkeit ist die Voraussetzung für einen sicheren Bahnbetrieb. Durch ihre betriebliche Relevanz und die sie kennzeichnenden hohen Anschaffungspreise und langen Nutzungsdauern besitzen die Systeme der Bahnsicherungstechnik einen hohen unternehmerischen Stellenwert [Lei07]. Damit bildet die Bahnsicherungstechnik einen wichtigen Baustein bei dem Vorhaben, die Wirtschaftlichkeit des Infrastrukturbetriebs und damit des gesamten Eisenbahnbetriebs zu steigern. Gleichzeitig bestehen Verbesserungspotentiale im Investitionsprozess und dem Instandhaltungsmanagement der Systeme der Bahnsicherungstechnik. Diese Rahmenbedingungen bilden den Ausgangspunkt für die vorliegende wissenschaftliche Arbeit.

An den Systemen der Bahnsicherungstechnik soll gezeigt werden, welchen Beitrag der Ansatz der integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategie für die Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Systems Bahn liefern kann. Die Neuartigkeit dieses Ansatzes gründet sich zum einen auf der integrativen Betrachtung als auch auf der Art und Weise der Bewertung von Investitionsalternativen.

Kern des Ansatzes ist eine lebenszyklusorientierte Analyse von Investitionsstrategien für Bahnsicherungstechnik. Eine ausschließliche Betrachtung der Investitionsausgaben gilt für die langlebigen, instandhaltungsintensiven Systeme der Bahnsicherungstechnik als betriebswirtschaftlich überholt. Untermauert wird dies durch Abbildung 1. Sie zeigt, dass für die Bahnsiche-

¹ Die Richtlinie 2001/12/EG baut auf der Richtlinie 91/440/EWG auf und regelt den Zugang von im internationalen Verkehr zugelassenen Schienengüterverkehrsunternehmen zu nationalen Netzen. Der Vorschlag für eine Verordnung KOM 2004/139 baut ebenfalls auf der Richtlinie 91/440/EWG auf und behandelt die Öffnung der Netze für den grenzüberschreitenden Personenverkehr bis 2010 (siehe auch [Pör07]).

rungstechnik die jährlichen Betriebs- und Instandhaltungskosten pro Gleiskilometer höher sind als die durch die Investition verursachten Kapitalkosten. Eine Investitionsentscheidung ausschließlich basierend auf den Investitionsausgaben wäre demzufolge nicht zielführend.

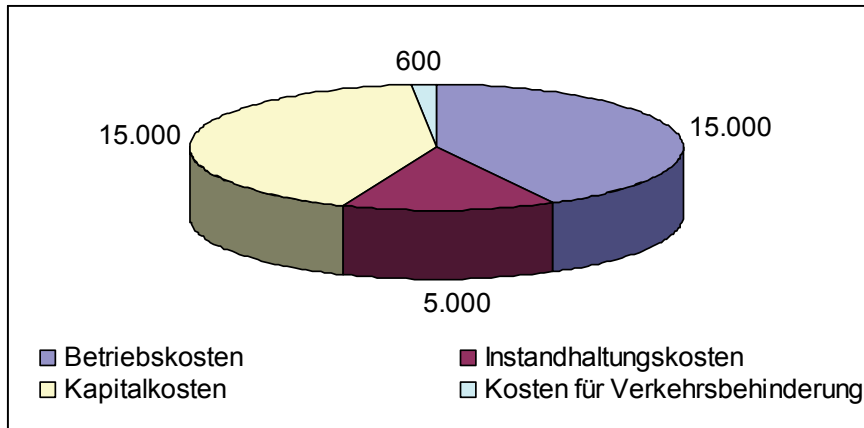


Abbildung 1: Jährlicher Gesamtaufwand für Bahnsicherungstechnik in € / Gleiskilometer [Zsc06]; [UIC02b]

Während sich die Betrachtung der Lebenszykluskosten immer mehr in der Praxis durchsetzt, erfolgt dies im Allgemeinen rein monetär ohne Berücksichtigung qualitativer Aspekte. Dies ist als kritisch zu bewerten und wird entsprechend in dem neuartigen Bewertungsverfahren adressiert. Dazu wird auf Informationen aus Eisenbahnbetriebssimulationen, wie sie für Fahrplanuntersuchungen und Streckenleistungsbetrachtungen ausgeführt werden, zurückgegriffen und in den Investitionsentscheidungsprozess einbezogen.

Derzeit wird dem Einfluss der Instandhaltungsstrategie im Rahmen investiver Entscheidungen nur eine geringe Aufmerksamkeit geschenkt. Dies gilt im Besonderen für die bisher vorrangig traditionell gemanagten Anlagen der Bahnsicherungstechnik. Deren Instandhaltung richtet sich derzeit vorrangig nach zeitlichen und weniger nach abnutzungsabhängigen Kriterien. Dies lässt Optimierungsmöglichkeiten vermuten, deren Umfang und Art es zum Zeitpunkt von Investitionsentscheidungen einzuschätzen gilt, insbesondere da sie sich stark durch die Investition selbst bestimmen. Dass Investitionsentscheidungen für Bahnsicherungstechnik nicht ohne genaue Analysen der jeweilig möglichen Instandhaltungsstrategien zu einem aus unternehmerischer Sicht besten Ergebnis führen, ergibt sich aus dem engen Zusammenhang zwischen der gewählten Investitionsalternative und den damit zu erwartenden, von der Instandhaltungsstrategie abhängigen Instandhaltungskosten (Abbildung 2) ([Sch05], S. 310 ff.).

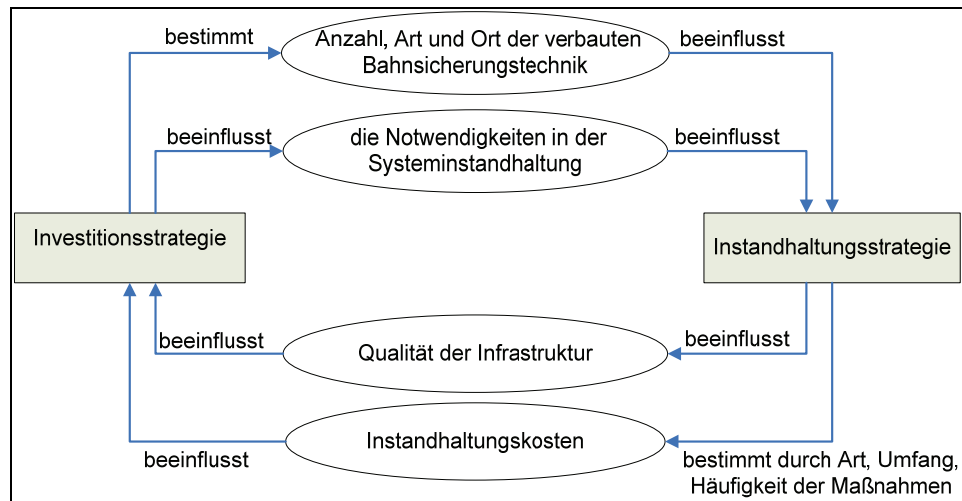


Abbildung 2: Zusammenhang Investitions- und Instandhaltungsstrategie

Unterstrichen wird diese Notwendigkeit durch den prinzipiellen Grundsatz, dass die Qualität des Leistungsangebots und die dabei entstehenden Kosten die wichtigsten Bestimmungsgrößen für den Erfolg eines Unternehmens sind. Während die Kosten in erster Linie durch die Wahl der Investitionsstrategie bestimmt sind, beeinflusst die Wahl der Instandhaltungsstrategie im hohen Maße die dauerhafte, über den Nutzungszeitraum vorhandene Qualität der sicherungstechnischen Anlagen und damit der Verkehrsleistung.

Die Zielstellung dieser Arbeit ist es, den Eisenbahninfrastrukturmanagern aufbauend auf der Idee der integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien ein Instrumentarium an die Hand zu geben, dass sie bei notwendigen Investitionsentscheidungen unterstützt und ihnen eine im Vergleich zu bisherigen Bewertungsansätzen wesentlich bessere Entscheidungsgrundlage schafft.² Mit dem entwickelten Verfahren soll der theoretischen wie praktischen Forderung nachgekommen werden, eine integrierte Betrachtung von LCC-basierten Investitionsstrategien und Instandhaltungsstrategien sicherzustellen [Bor07]. Es ist zu vermuten, dass dieses Werkzeug zum einen zu mehr ökonomischer Effizienz bei den Infrastrukturmanagern und zum anderen zu einer sparsameren Verwendung von Steuergeldern führt. Somit hat es sowohl eine betriebswirtschaftliche wie volkswirtschaftliche Relevanz.

Dabei sei die Tragweite der integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien an folgendem Beispiel verdeutlicht. Wenn in den kommenden 10 Jahren Neuinvestitionen in 1000 Stellwerke notwendig sind [Bor06], würden geringere Lebenszykluskosten jedes einzelnen Stellwerks von im Mittel lediglich 50.000 Geldeinheiten (GE) (gemessen am Gesamtvolumen solcher Projekte, ist dies wenig und damit eine durchaus realistische Größe) bei gleicher Betriebsqualität zu unternehmerischen Einsparungen von 50 Mio. GE führen. In Anbetracht der Tatsache, dass in Deutschland Investitionsmaßnahmen in Eisenbahninfrastruktur

² So wird bspw. im Rahmen der Bewertung von Investitionsvorhaben oftmals auf das Verfahren der „Standardisierten Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen“ [Hei00] verwiesen. Da dieses jedoch vorrangig auf die Analyse des volkswirtschaftlichen Kosten-Nutzen-Verhältnisses ausgerichtet ist, ist es für eine betriebswirtschaftliche Bewertung, wie sie ein Eisenbahninfrastrukturmanager durchzuführen hat, ungeeignet.

mit ca. 90 Prozent vom Staat subventioniert werden, würde dies zusätzlich zu nicht unerheblichen Einsparungen von Steuergeldern führen. Dass darüber hinaus mittel- bis langfristig eine Verminderung der vom Fahrgast zu leistenden Fahrtgelder möglich ist, sei an dieser Stelle nur am Rand erwähnt.

1.2 Inhalt und wissenschaftliche Einordnung der Arbeit

Den Kern dieser Arbeit bildet das Verfahren der integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien für die Bahnsicherungstechnik. Dieses baut auf folgenden drei wesentlichen Schritten auf.

1. Bewertung alternativer Streckenausrüstungen (Bahnsicherungstechnik) mittels Ergebnissen aus Eisenbahnbetriebssimulationen in Form einer erweiterten Wirtschaftlichkeitsanalyse.
2. Modellierung und simulative Bewertung von Instandhaltungsstrategien für die in (1.) identifizierte(n) Investitionsalternative(n) mit Hilfe von Zustandsinformationen.
3. Kombination der Ergebnisse aus (1.) und (2.) für eine abschließende Investitionsempfehlung

Diese Schritte werden einzeln erarbeitet und begründet sowie an einer Fallstudie erläutert.

Damit liefert diese Arbeit erstmals eine Bewertungsprozedur, mit der durch eine integrierte Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von Investitionsmöglichkeiten und dazugehörigen Instandhaltungsalternativen eine aus Sicht des Betreibers unternehmerisch weitsichtigste Entscheidung bei notwendigen Streckenum- bzw. -neuausrüstungen getroffen werden kann. Dabei definiert sich eine solche Entscheidung zum einen durch die bestmögliche Erfüllung der betrieblichen Anforderungen d.h. einer hohen Betriebsqualität und zum anderen durch niedrige Lebenszykluskosten (LCC). Beide Aspekte sind elementar für Attraktivität und damit Wettbewerbsfähigkeit der Eisenbahninfrastruktur. Dabei ist der hier verfolgte Ansatz der integrierten Bewertung auf Basis detaillierter Informationen zu Investition und Instandhaltung nicht nur für die Anlagen der Bahnsicherungstechnik neu, sondern wurde auch in anderen technologieorientierten Branchen wie bspw. dem Maschinen- und Anlagenbau oder der Luftfahrtindustrie noch nicht aufgegriffen.

Selbstverständlich ist die Arbeit nicht losgelöst von bestehenden wissenschaftlichen Betrachtungen entstanden. Einige der bereits erfolgten Überlegungen und Untersuchungsansätze wurden in Teilen aufgegriffen oder schafften wichtige Impulse für die vorliegende Arbeit. So bildeten die etablierten Verfahren der Investitionsrechnung, wie in [Sei01], [BLS06] und [Kru07] beschrieben, eine wichtige Säule im Entstehungsprozess der Arbeit. Bereichert werden diese Ansätze durch den Gedanken der Lebenszykluskosten wie er erstmals in [Wüb84] aufgegriffen und durch die Arbeiten von [Für92], [Rie96] und [Sch05] ergänzt wurden. Eine interessante Erweiterung des bis dahin rein quantitativen Bewertungsansatzes wird durch eine Nutzenbewertung nach [ZG91], [Saa94] und [PB00] möglich. [Zan00] führt die Überlegungen der quantitativen und qualitativen Bewertung zusammen. All diese Erkenntnisse fließen in die

Investitionsstrategiebewertung ein. Die Gedanken zur Untersuchung und Bewertung von Instandhaltungsstrategien bauen zum einen auf den grundlegenden Werken zur Instandhaltungsstrategiegestaltung [Kel97] [Nea95] und des Asset Managements [Wil02] [Mit07] auf. Zum anderen wurden konkrete Ansätze zur Bewertung von Aspekten des Instandhaltungsmanagements auf Basis einer Zustandsapproximation bzw. Nachbildung des Ausfallverhaltens in dieser Arbeit berücksichtigt. Außerhalb des Bahnumfelds wurde diese Idee in den Arbeiten von [Ada89], [Stu96], [Los96], [Pro02] und [Eng03] aufgegriffen und verarbeitet. Im Rahmen von bahnspezifischen Betrachtungen wurden die Möglichkeiten für ein verhaltensorientiertes Asset Management für den Oberbau untersucht [Sch93] [Lev97] [Hem06]. Dabei gilt für all diese Arbeiten unabhängig von der Branchenzugehörigkeit, dass sie mit Bezug zu bereits im Betrieb befindlichen Anlagen entstanden sind, also operativer Art sind. Die Möglichkeit und der potentielle Mehrwert solcher Betrachtungen im Rahmen von Investitionsentscheidungen werden darin nicht aufgegriffen. Interessante Aspekte liefern zudem die Arbeiten von [Vei99] und [Lie07]. [Vei99] verfolgt in seiner Arbeit den Gedanken der Bewertung von Investitionsalternativen in den Oberbau. Dabei verfolgt er, wie auch in dieser Arbeit beherzigt, den Lebenszyklusansatz, lässt aber eine detaillierte Instandhaltungsstrategiebewertung sowie die Erfassung nutzenbezogener Unterschiede in den Investitionsalternativen vermissen. Die Arbeit von [Lie07] entstand ebenfalls im Bahnumfeld. In ihr werden die Möglichkeiten und die dazu notwendigen Informationen für eine Erfassung von Infrastrukturkosten mit Hilfe von Eisenbahnbetriebssimulation benannt und zusammengetragen, wobei das Ziel einer möglichst umfassenden und weniger detaillierten Erfassung verfolgt wird. Zudem geht es in dieser Arbeit in erster Linie um die prinzipielle Machbarkeit einer solchen Anbindung sowie deren Umsetzung in einer ausgewählten Simulationssoftware. Eine Einbindung von Eisenbahnbetriebssimulation in den Investitionsentscheidungsprozess steht hier nicht im Vordergrund. [Wal94] adressiert die Frage nach strategischen/ makroskopischen Verkehrswegeentscheidungen, davon grenzt sich das Bewertungsverfahren dieser Arbeit aufgrund der detaillierten Betrachtung von Eisenbahnstrecke bzw. Netzabschnitt klar ab. Ebenso wenig sind Fragestellungen von Seiten der Systemhersteller Gegenstand der Betrachtungen, wohl aber können Erkenntnisse aus der Anwendung dieser Bewertungssystematik für die Hersteller aufschlussreich sein. Sie lassen Rückschlüsse auf die an die Systeme gestellten Anforderungen bzw. möglichen Verbesserungsansätze zu (vgl. Abschnitt 7.2).

Das mit dieser Arbeit vorgestellte Verfahren der integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien (in Bahnsicherungstechnik) liefert ein wichtiges Glied in der Kette des Lebenszyklusmanagements für Bahnsicherungstechnik. So kann diese Arbeit entsprechend Abbildung 3 in den Kontext zu bisherigen Arbeiten, die Teilaspekte des Lebenszyklus von bahnsicherungstechnischen Anlagen abbilden, gestellt werden.

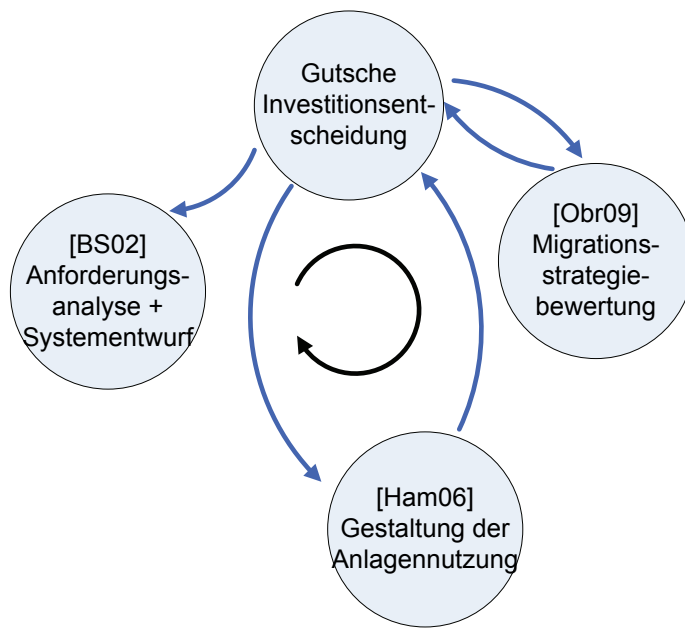


Abbildung 3: Wissenschaftliche Einordnung dieser Arbeit

[BS02] stellen sich der Frage nach einer Optimierung der Anlagenentwicklung mittels verbesserter Anforderungsanalyse und -umsetzung. Entsprechend des Lebenszyklusansatzes erfolgt nach der Anlagenerstellung die Investitionsentscheidung. Hierzu soll die vorliegende Arbeit einen wichtigen Beitrag liefern. Ist die Entscheidung getroffen, muss der Weg der Systemmigration bestimmt werden. [Obr09] hat diese Frage, mit besonderem Bezug zur Einführung von ETCS, umfassend untersucht. [Ham06] führt die lebenszyklusorientierte Betrachtung durch seine Untersuchungen zu Möglichkeiten des Service Level Managements für eine optimale Anlagennutzung zu Ende, gleichwohl sich die Arbeit auf eine globale Untersuchung des Gesamtsystems Bahn bezieht. Wie in Abbildung 3 schematisch verdeutlicht, gibt es verschiedene Berührungspunkte zwischen den benannten Arbeiten und dieser Arbeit. Zum einen ist zu überlegen, wie die Erkenntnisse aus der integrierten Bewertung in die Überlegungen von [BS02] einfließen und die Anforderungsanalyse bereichern. Im Rahmen von Migrationsentscheidungen ist die Durchführung der integrierten Bewertung unbedingt zu empfehlen. Sie unterstützt bei der Wahl des zu migrierenden Systems. Gleichzeitig bilden Migrationskosten und -nutzen einen Bestandteil der integrierten Bewertung. Das Gleiche gilt auch für die Möglichkeiten in der Nutzungsphase mittels Service Level Management. Sie alle beeinflussen das Ergebnis der integrierten Bewertung und sind mit ihren quantitativen wie qualitativen Auswirkungen hierin zu berücksichtigen. Im Gegenzug liefert die integrierte Bewertung wichtige Informationen für die Evaluation der Möglichkeiten in der Nutzungsphase, insbesondere durch die Zustandsprognose.

Daneben gibt es zweifelsohne weitere wissenschaftliche Betrachtungen zu Fragen die mehr oder weniger die Anlage in ihrem Lebenszyklus beeinflussen. Sie sind aber in erster Linie Detailuntersuchungen und können in keinen direkten Bezug zu dieser Arbeit gestellt werden. Arbeiten mit Bezug zum Lebenszyklusansatz, aber ohne Bezug zur Bahnsicherungstechnik, sind aufgrund ihrer Vielzahl hier nicht aufgeführt

1.3 Aufbau der Arbeit

Zur technologischen Einordnung der Arbeit wird in Kapitel 2 zunächst ein Überblick über die betrachtete Anlagengruppe der Eisenbahnsicherungstechnik gegeben. Dabei wird auf die Funktionsweise der einzelnen Systeme sowie auf deren funktionale Zusammengehörigkeit eingegangen. Abschließend werden jene Systeme identifiziert, die im Fokus der hier durchgeführten Betrachtungen liegen.

In Kapitel 3 werden die wesentlichen betriebswirtschaftlichen Grundlagen, wie sie für die Bewertung von Investitionsstrategien benötigt werden, zusammengestellt. Neben der Erläuterung des Investitionsbegriffs wird die Notwendigkeit für eine, den gesamten Lebenszyklus der Bahnsicherungstechnikanlagen umfassende Bewertung hinsichtlich Kosten und Nutzen verdeutlicht. Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen werden Struktur und Aufbau des entwickelten Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstruments erläutert. Da dieses unter anderem auf Informationen aus Eisenbahnbetriebssimulationen aufbaut, wird zusätzlich die aufgestellte Verknüpfung zwischen Bewertungsinstrument und Betriebssimulation erläutert.

Um eine Bewertung von Instandhaltungsstrategien zu ermöglichen, werden in Kapitel 4 zunächst wesentliche Kenntnisse zum Themenbereich der Instandhaltung vermittelt. Aufbauend auf den prinzipiellen, theoretisch denkbaren Instandhaltungsstrategiealternativen wird eine Modellierungsgrundlage basierend auf der Beschreibung des Schädigungsprozesses von technischen Systemen erarbeitet. Diese ermöglicht es, die Instandhaltungsstrategien abzubilden und zu simulieren und unter dem Gesichtspunkt minimaler Kosten zu bewerten.

Warum und wie eine integrierte Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien umzusetzen ist, mit welchen Arbeitsschritten dies verbunden ist und welche Informationen dazu benötigt werden, wird in Kapitel 5 erläutert. Die in den Kapiteln 3 und 4 geschaffenen Grundlagen werden dazu aufgegriffen.

In Kapitel 6 werden die Ausführungen aus den Kapiteln 3 und 4 sowie die in Kapitel 5 beschriebene Vorgehensweise für das hier neu entwickelte Bewertungsverfahren auf ein praktisches Beispiel angewendet. Damit soll die Praxistauglichkeit des Bewertungsverfahrens veranschaulicht werden. Die in Kapitel 5 aufgestellten Thesen werden herangezogen, um die Notwendigkeit für eine integrierte Bewertung zu beurteilen.

Kapitel 7 gibt abschließend eine Zusammenfassung der Arbeit und verdeutlicht die möglichen Anwendungsfelder sowie die Vorteile, die mit Anwendung der neuen Bewertungssystematik

erzielbar sind. Außerdem werden offene Fragestellungen für weitergehende Betrachtungen benannt.

Abbildung 4 verschafft einen Überblick über den Aufbau der Arbeit.

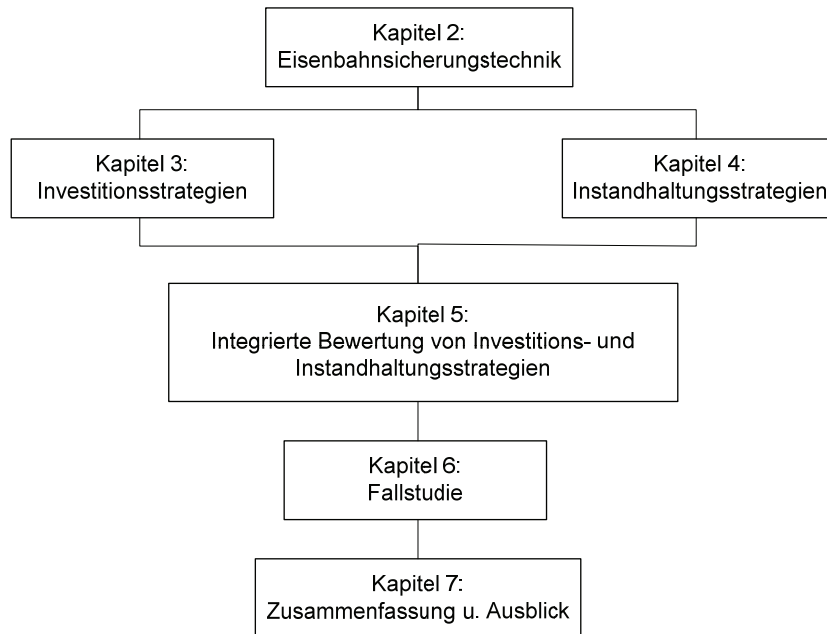


Abbildung 4: Struktur der Arbeit

2 Eisenbahnsicherungstechnik

Die Eisenbahnsicherungstechnik ist ein wesentliches Element des Schienenfahrwegs. Somit liegen Investitions- und Instandhaltungsentscheidungen in der Verantwortung der Eisenbahninfrastrukturunternehmen.

Die Eisenbahnsicherungstechnik gehört zu der Anlagenklasse, der aufgrund von

- hohen Investitionsausgaben,
- langen Anlagenlebensdauern und
- hohen Verfügbarkeitsanforderungen

umfassenden Analysen und Bewertungen von alternativen Investitionsstrategien ein hoher Stellenwert beigemessen werden sollte. Dabei spielen richtige Investitions- und Instandhaltungsentscheidungen für die Sicherungstechnik sowohl aus Unternehmensperspektive als auch aus Sicht der Volkswirtschaft eine wichtige Rolle (vgl. Abschnitt 1.1). Deshalb soll das Verfahren der integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien in dieser Arbeit für die Anlagen der Eisenbahnsicherungstechnik entwickelt werden.

Für ein besseres Verständnis der Anlagentechnik sind im Folgenden zunächst die wesentlichen Begrifflichkeiten und Zusammenhänge in der Sicherungstechnik erläutert.

2.1 Struktur

Die Eisenbahnsicherungstechnik dient der Steuerung und Sicherung der Fahrten von Schienenfahrzeugen durch Vermeidung von Kollisionen (Zusammenprall, Aufprall, Zusammenstoß) und Entgleisungen. Damit bildet die Sicherungstechnik eine wesentliche Voraussetzung für einen leistungsfähigen schienengebundenen Transportprozess ([FNT03], S. 5). Die Notwendigkeit für den Einsatz von Sicherungstechnikanlagen ergibt sich aus den systemimmanenten Eigenschaften der

- langen Bremswege durch geringe Haftreibung (Stahl auf Stahl) und
- der Spurführung.

Die Eisenbahnsicherungstechnik bildet zusammen mit der Leittechnik die Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik (LST), einem Begriff, der von der Deutschen Bahn (DB AG) geprägt wurde ([Fen07], S. 599 ff.). Mit der Eisenbahnleittechnik werden die dispositiven Tätigkeiten zur Durchführung des Schienenverkehrs wahrgenommen. Sie soll in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden.

Nachfolgende Abbildung 5 zeigt die wesentlichen Elemente der Eisenbahnsicherungstechnik. Diese beinhalten sowohl die strecken- als auch die fahrzeugseitigen Komponenten. Im Rahmen dieser Arbeit steht die Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien für eine definierte Eisenbahninfrastruktur im Mittelpunkt der Betrachtungen. Es soll dem Eisen-

bahninfrastrukturunternehmen (EIU) ein Bewertungsinstrument an die Hand gegeben werden. Somit sind die fahrzeugseitigen Komponenten der Bahnsicherungstechnik, die vom Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) zu finanzieren und zu unterhalten sind, nicht in die Analyse und Bewertung der Strategien einzubeziehen.³

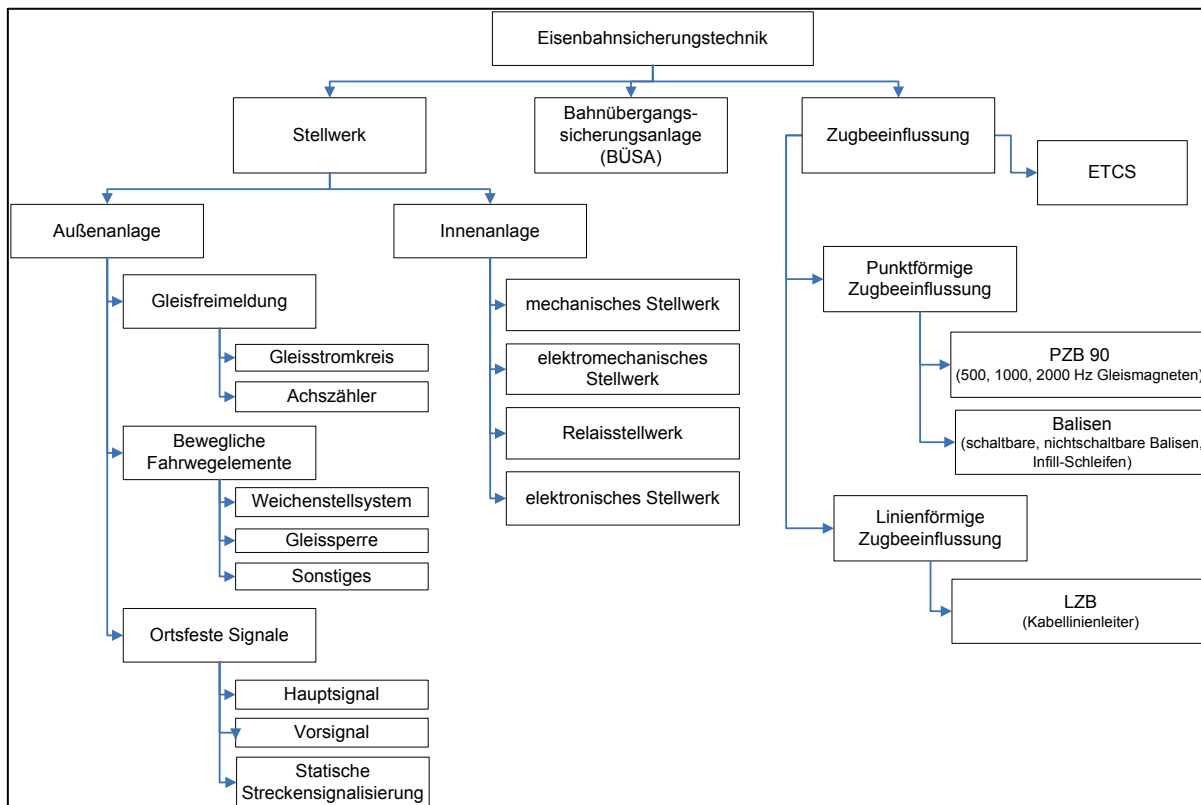


Abbildung 5: physische Strukturierung der streckenseitigen Eisenbahnsicherungstechnik

Wie aus obiger Abbildung ersichtlich wird, teilt sich die Eisenbahnsicherungstechnik in die drei Systeme Stellwerk, Bahnübergang und Zugbeeinflussung. Die folgende kurze Erläuterung der technischen Systeme dient vorrangig als Überblick und verschafft ein allgemeines Systemverständnis. Für weitergehende, detaillierte Informationen wird auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen [FNT03].

Bahnübergangssicherungsanlagen (BÜSA) dienen dem Schutz der Schienenfahrzeuge und Reisenden vor systemfremden Verkehrsteilnehmern. Aufgrund ihres gesonderten Stellenwerts hinsichtlich Systemkomplexität und Schnittstellenfunktion zu angrenzenden Verkehrssystemen verlangen BÜSA nach einer gesonderten Betrachtung und sind zunächst bei der Aufstellung des Bewertungsinstruments integrierter Investitions- und Instandhaltungsstrategien nicht enthalten.

³ Lediglich im Rahmen der qualitativen Bewertung kann dieser Aspekt in Form möglicher Zugangsrestriktionen eines EVUs zum Streckennetz berücksichtigt werden (siehe Abschnitte 3.1.2 und 6.2.3.4)

Die Zugbeeinflussung überwacht die Fahrzeuggeschwindigkeit, stellt die Beachtung der Signalbegriffe durch den Triebfahrzeugführer sicher und verhindert somit mögliche Fehlhandlungen, die die Systemsicherheit gefährden. Es gibt verschiedene technische Umsetzungsmöglichkeiten, prinzipiell unterscheidet man jedoch in Abhängigkeit von der Art der Informationsübertragung zwischen einer punktförmigen, d. h. an diskreten Streckenpunkten, und einer linienförmigen, d. h. kontinuierlichen Zugüberwachung. Eine punktförmige Zugbeeinflussung wie der Einsatz der PZB 90 oder von Balisen ist in Deutschland nach der EBO ab einer Streckengeschwindigkeit von mehr als 100 km/h vorgeschrieben. Das meist verbreitete System einer kontinuierlichen Zugbeeinflussung, die zwingend für Geschwindigkeiten größer 160 km/h vorhanden sein muss, ist die Linienzugbeeinflussung (LZB) unter Einsatz von Kabellinienleitern. Neben diesen drei technischen Lösungsmöglichkeiten wird der Einbau des European Train Control Systems (ETCS)⁴ im deutschen Schienennetz vorangetrieben, wobei je nach ETCS-Level eine punktförmige oder linienförmige Zugbeeinflussung umgesetzt wird. Da hierzu bisher wenige praktische Erfahrungen vorliegen und ETCS im ersten Schritt auf definierten Streckenabschnitten, sogenannten Korridoren [UIC04], eingebaut werden soll, wird die Wirtschaftlichkeit eines ETCS-Systems bei der praktischen Anwendung des aufgestellten Verfahrens zur integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien (siehe Kapitel 6) nicht betrachtet.

Wesentliches Augenmerk bei der Definition von Investitionsstrategien unter Berücksichtigung möglicher Instandhaltungsalternativen liegt auf dem System Stellwerk, was sich grob in Innen- und Außenanlage aufteilt. Das Stellwerk übernimmt den überwiegenden Teil der Sicherungsaufgaben im Schienenverkehr. Wesentliche Aufgabe der Innenanlage mit der Stellwerkslogik ist die Einstellung und Überwachung eines Fahrwegs, seiner beweglichen Fahrweegelemente sowie die Erfüllung weiterer sicherheitsrelevanter Bedingungen. Man unterscheidet in Abhängigkeit von der Technik bei der Stellwerksinnenanlage zwischen mechanischen Stellwerken (MSTW), elektromechanischen Stellwerken (EMSTW), Relaisstellwerken (RSTW) sowie elektronischen Stellwerken (ESTW).⁵ Die Stellwerksaußenanlagen, die auch aus Sicht der Instandhaltung besonderer Aufmerksamkeit bedürfen, untergliedern sich in Gleisfreimeldeeinrichtungen, bewegliche Fahrweegelemente sowie ortsfeste Signale. Gleisfreimeldeeinrichtungen prüfen das Freisein des betrachteten Streckenabschnitts von Fahrzeugen und spielen somit eine zentrale Rolle in der Kollisionsvermeidung. Dabei können entweder Gleisstromkreise oder Achszähler zum Einsatz kommen. Bei einem Gleisstromkreis wird das Vorhandensein eines Fahrzeugs im Freimeldeabschnitt dadurch detektiert, dass der eingespeiste Freimeldestrom nicht zur Empfangseinrichtung fließt, sondern diese durch den Achsnebenschluss stromlos wird. Der Achszähler basiert auf einem einfachen Vergleich der in den betrachteten Streckenabschnitt ein- und ausfahrenden Achsen. Ist die Differenz null, so wird der Abschnitt als frei gemeldet. Die beweglichen Fahrweegelemente, unter denen die Weiche eine aus betrieblicher

⁴ ETCS bildet die Norm für ein europäisch einheitliches Zugbeeinflussungssystem. Es ist Bestandteil des European Rail Traffic Management Systems (ERTMS) – einem Konzept zur technischen Harmonisierung der europäischen Schienennetze, und soll die länderspezifischen Lösungen zur Zugbeeinflussung in Europa ablösen und somit zur Interoperabilität der Triebfahrzeuge beitragen.

⁵ Für nähere Informationen siehe [Pre96] und [Lor98]

Sicht besonders wichtige Rolle einnimmt, ermöglichen einen Gleiswechsel oder den Aufenthalt eines Schienenfahrzeugs auf einem Streckenabschnitt. Bei einer reinen Betrachtung der Bahnsicherungstechnik spielt nur das Weichenstellsystem als die Einheit, die sichernde Funktionen wahrnimmt, eine Rolle. Alle übrigen Weichenelemente werden zum Oberbau gezählt. Die sichernden Funktionen einer Weiche umfassen das Umstellen der Weiche, das Festhalten sowie die Endlagenprüfung. Bei den ortsfesten Signalen, die die Fahrstraßensignalisierung für den Triebfahrzeugführer übernehmen, wird je nach Funktion und Ausstattung des Signals in Vor- und Hauptsignale unterschieden. Dabei werden bei Neuinvestitionen nur noch Lichtsignale verwendet, Formsignale sollen deshalb nicht Gegenstand der Betrachtung sein. Zusätzlich gibt es noch statische Streckensignalisierung wie sie beispielsweise mit Halte- oder Trapeztafeln realisiert wird. Diese Elemente der Bahnsicherungstechnik sind vor allem bei Regionalbahnen vorzufinden.

2.2 Fokus der Betrachtung

Ausgehend von der gegebenen Strukturierung der Eisenbahnsicherungstechnik und zugehörigen Erläuterungen sowie unter Einbeziehung der in der Praxis vorzufindenden wirtschaftlichen Relevanz der Teilsysteme wird im Rahmen dieser Arbeit der Fokus auf folgende Elemente der Sicherungstechnik gelegt:

- Stellwerksinnenanlage
- Achszähler
- Gleisstromkreis
- Haupt- und Vorsignale (nur Lichtsignale)
- Weichenstellsystem
- Statische Streckensignalisierung
- Zugbeeinflussungssysteme PZB 90, LZB und Balisen

Bahnübergänge sowie das europäische Zugbeeinflussungssystem werden mit der in Abschnitt 2.1 gegebenen Begründung nicht betrachtet, sind aber der Vollständigkeit halber und aufgrund ihrer wachsenden Bedeutung (gilt vor allem für ETCS) in zukünftige Untersuchungen zu integrieren.

Die hiermit getroffene Festlegung ist die Grundlage für die folgenden Kapitel. Die Definition der relevanten Teilsysteme ist zum einen Voraussetzung für die Auslegung des Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstruments und dessen Schnittstellen zur Eisenbahnbetriebssimulationssoftware (siehe Kapitel 3). Zum anderen richtet sich danach, welche notwendigen Parameter und Abhängigkeiten bei der Modellierung der Instandhaltungsstrategien abzubilden sind (siehe Kapitel 4).

3 Investitionsstrategien

Der Bedarf für eine genaue Betrachtung von Investitionsalternativen in die Eisenbahninfrastruktur ergibt sich aus dem zunehmenden Wettbewerbsdruck auf dem Verkehrsmarkt. [Eur01]; [DB08] Dem Verkehrsträger Schiene muss es gelingen sowohl im Güter- wie im Personenverkehr ein attraktiver Logistikanbieter zu sein, und damit seine Marktposition durch Steigerung der Marktanteile zu festigen. Nachhaltige Investitionsentscheidungen für den Schienenfahrweg unter Berücksichtigung jährlicher Betriebs- und Erhaltungsaufwendungen sind dabei eine wesentliche Säule für die Zukunftssicherung der Bahnen. Dazu sind neben genauen Investitionsanalysen von Oberbau [Hem06] und Fahrbahn [HK06] [Vei99] [Vei00] ebenfalls Verbesserungen in der Bewertung von Investitionen im Bereich der Bahnsicherungstechnik notwendig. Obwohl Letzteres deutlich in [Bor07] herausgestellt wird, fehlen bislang vergleichbare Ansätze bzw. Instrumente.

Für ein besseres Verständnis werden zunächst die theoretischen Grundlagen investiver Entscheidungen dargelegt. Darin wird erläutert, was unter einem lebenszyklusorientierten Bewertungsansatz zu verstehen ist und warum dies unter der Prämisse einer quantitativen und qualitativen Bewertung der Alternativen zu erfolgen hat (vgl. Abschnitt 3.1). Die damit identifizierten Anforderungen bilden eine Grundlage für den in Abschnitt 3.2 dargelegten Schritt. Darin wird das Vorgehen bei einer Wirtschaftlichkeitsanalyse von Investitionsstrategien in Bahnsicherungstechnik erläutert. Dabei werden die Vorteile einer Verwendung von Informationen aus Eisenbahnbetriebssimulationen herausgestellt und deren Anbindung an das Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstrument beschrieben. Kapitel 3 bildet damit einen wichtigen Baustein für das in Kapitel 1 beschriebene, neuartige Bewertungsverfahren.

3.1 Investition und Investitionsstrategie

Unter einer Investition im engeren Sinne versteht man in der Praxis der Unternehmung den zielgerichteten Einsatz finanzieller Mittel zur Beschaffung (Kauf, Eigenfertigung, Finanzierungsleasing) von Anlagevermögen mit den gewünschten produktionswirtschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten. Entscheidungen zu Investitionen sind dabei in der Regel gekennzeichnet durch

- eine mehrjährige Kapitalbindung,
- Langfristigkeit,
- Irreversibilität bzw. eine nur mit zusätzlichen finanziellen Mitteln umkehrbare Entscheidung,
- erhöhtes wirtschaftliches Risiko.

Diese Eigenschaften machen umfassende Analysen und die Verwendung von entscheidungsunterstützenden Prozessen und Instrumenten notwendig. Eine wesentliche Entscheidungshilfe bietet die Investitionsrechnung. [Kru07] [PS07] [BLS06] [Sei01] Mit Hilfe der Verfahren der

Investitionsrechnung⁶ werden alle monetären Aspekte, die eine rationelle Beurteilung der Investitionsalternativen ermöglichen, erfasst und bewertet. Zusätzlich bestimmen nicht monetär erfassbare Größen zum Teil wesentlich die Vorteilhaftigkeit von Investitionsalternativen. Dies macht eine Erweiterung des klassischen Ansatzes der Bewertung von Investitionsalternativen allein anhand rechenbarer Größen zwingend notwendig (vgl. [Zan00]) und wird entsprechend bei der Entwicklung des nachfolgend beschriebenen Bewertungsverfahrens berücksichtigt.

Die notwendigen Arbeitsschritte für eine solche quantitative wie qualitative Bewertung der Investitionsalternativen sowie die Notwendigkeit für eine Lebenszyklusbetrachtung werden nachfolgend erläutert und bilden die Grundlage für das Verständnis des hier entwickelten Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstruments. Dabei wird im Folgenden der Begriff der Investitionsalternativen und Investitionsstrategien gleichbedeutend verwendet. Der Begriff der Investitionsstrategie⁷ wird jedoch bevorzugt, da er zum einen das Entscheidungsumfeld für die langlebigen Anlagengüter der Eisenbahnsicherungstechnik genauer kennzeichnet und zum anderen den Kern des hier entwickelten Bewertungsverfahrens treffender beschreibt. Dessen Fokus liegt auf einer möglichst umfassenden und nicht möglichst detaillierten Abbildung der relevanten Bewertungsaspekte [DIN05].

3.1.1 Analyse der Lebenszykluskosten

Die mit einer Investitionsstrategie verbundenen Kosten bilden zusammen mit dem erzielbaren Nutzen die Grundlage für eine Investitionsentscheidung. Eine Kostenbewertung über den gesamten Lebenszyklus (siehe Abschnitt 3.1.1) ist dabei zwingend notwendig, besonders in Anbetracht der belegten Tatsache, dass nur Lebensdauer bezogene minimale Aufwendungen den Gewinn und Erfolg von Unternehmen auf Dauer sichern. [Wüb84] [Sch05] [Rie96] Dies macht die Anwendung des LCC-Ansatzes im Rahmen der Bewertung von Investitionsalternativen für die langlebige Bahnsicherungstechnik, für die gilt, dass Investitionen einen langen Wirkungszeitraum haben, unabdingbar (vgl. [VDI05]). Nur so kann man den noch heute in vielen Branchen verbreiteten Fehler, Investitionsentscheidungen einzig an den Anschaffungsausgaben zu treffen, vermeiden (vgl. Abbildung 6).

⁶ Die Investitionsrechnung umfasst alle Verfahren, die eine rationelle Beurteilung der rechenbaren Aspekte der Investition ermöglichen. Die Investitionsrechnung stellt somit einen wesentlichen Teil der Investitionsstrategieentscheidungen, die sowohl rechenfähige wie nicht rechenfähige Aspekte berücksichtigen, dar. Auf eine detaillierte Betrachtung der möglichen Verfahren und die Unterscheidung in statische und dynamische Investitionsrechenverfahren wird an dieser Stelle verzichtet. [Kru07], [Sei01], [BLS06] bieten hierzu umfassende Informationen.

⁷ Der Begriff der Strategie wird in der Betriebswirtschaft als die „grundsätzliche, langfristige Verhaltensweise (Maßnahmenkombination) der Unternehmung und relevanter Teilbereiche [...] zur Verwirklichung der langfristigen Ziele“ [Had00] verstanden.

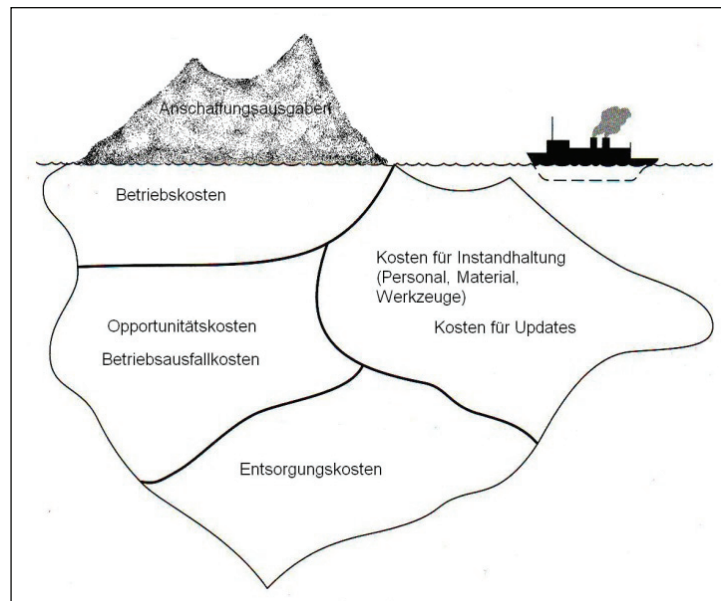


Abbildung 6: „Kosteneisberg“ ([Bla08], S. 6)

3.1.1.1 Lebenszykluskonzept

Das Grundmodell des Lebenszyklus⁸ geht davon aus, dass jedes Produkt und jede Anlage während seines Lebenszyklus zeitlich aufeinander folgende Phasen durchläuft. Prinzipiell gilt für alle Produkte und Anlagen, dass die Phasen das gesamte „Leben“ der Betrachtungseinheit von dessen Entstehung, über den Betrieb bis zur Entsorgung beschreiben. Dabei variiert die Länge der Phasen von System zu System. Generell geht PFEIFFER davon aus, dass jedes System eine begrenzte Lebensdauer hat. (vgl. [PMS+91], [Stu96], S. 31) Der Lebenszyklus für Anlagen der Bahnsicherungstechnik ist schematisch in Abbildung 7 dargestellt.

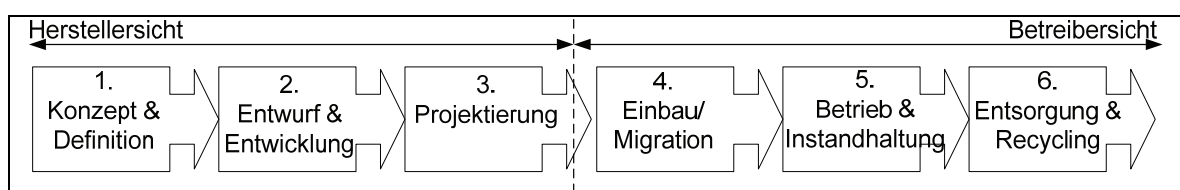


Abbildung 7: Lebenszyklus von Bahnsicherungstechnik

Für die integrierte Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien steht die Betreibersicht, und somit die Phasen der Anlageninstallation (4. Einbau/ Migration), Anlagenutzung, -instandhaltung und -verbesserung (5. Betrieb u. Instandhaltung) sowie die Anlagen- ausmusterung und -entsorgung (6. Entsorgung u. Recycling) im Mittelpunkt der Bewertung.

⁸ Eine umfassende Definition des Begriffs Lebenszyklus findet sich in [PMS+91]

3.1.1.2 Lebenszykluskosten

Nach DIN EN 60300-3-3 werden Lebenszykluskosten (LCC) als die kumulierten Kosten eines Produktes bzw. einer Anlage über dessen Lebenszyklus verstanden [DIN05]. Sie stellen somit den bewerteten Güterverbrauch zur Initiierung, Planung, Realisierung, zum Betrieb und zur Stilllegung eines Systems dar [Wüb84]. Dabei werden der Lebenszyklus und damit auch die hier verursachten Lebenszykluskosten in der Praxis häufig zweigeteilt betrachtet, abhängig in welchem Verantwortungsbereich sich das Produkt befindet. Man unterscheidet deshalb die Hersteller- und die Betreiberperspektive [VDI05] (siehe Abbildung 7). Für den Betreiber gilt das von ihm angeschaffte Produkt mit einem höchstmöglichen Beitrag zum Unternehmenserfolg und damit möglichst niedrigen Lebenszykluskosten zu bewirtschaften (Marktzyklus). Im Rahmen dieser Arbeit stehen die Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien im Vordergrund. Sie sind die Schlüsselfaktoren für die Höhe der Betreiber-LCC. Eine Analyse der Herstellersicht auf die LCC erfolgt somit nicht.

Mit einer Lebenszykluskostenanalyse werden sämtliche Anschaffungs- und Folgekosten einer Anlage oder eines Produktes über den Zeitraum seiner Nutzung erfasst [Für92]. Der Begriff „Kosten“⁹ in dem Begriff „Lebenszykluskosten“ ist dabei aus betriebswirtschaftlicher Sicht jedoch unpräzise. Vielmehr bilden die über den Lebenszyklus verteilt auftretenden Ein- und Auszahlungen die zu verwendenden Rechengrößen ([CFG07], S. 473 ff.). Trotz dieser begrifflichen Unschärfe, wird der Begriff „Kosten“ weitläufig verwendet und soll zum leichteren Verständnis auch in dieser Arbeit verwendet werden.

Lebenszykluskostenanalysen sind mit dem Problem zum Teil erhöhter Informationsunsicherheit behaftet. Wie in Abbildung 8 ersichtlich, ist dies besonders gravierend zu Beginn eines Produktlebenszyklus. Hier ist die Einflussnahme auf die LCC des Produktes am höchsten, denn in der Phase der Systementwicklung werden der größte Teil der Systemeigenschaften (z. B. Montagefähigkeit, Systemwartbarkeit, Verschleiß, Zuverlässigkeit etc.) (vgl. [Bec05], S. 29) und damit auch der Verlauf der LCC festgelegt. ([Dau02], S. 3) Hingegen ist der Wissensstand über die Entwicklung der LCC zu diesem Zeitpunkt am niedrigsten. [Sch05]

Begründet ist dies durch

- fehlende Systemkenntnis bei Entwicklung und Einführung des Produktes,
- die komplexen Zusammenhänge sowohl zwischen den einzelnen Lebenszykluskosten als auch den Systemkomponenten,
- die Unsicherheit über den Lebenszyklus, z. B. Änderungen der Einsatzbedingungen der Anlage.

Letzteres gilt im Besonderen für die Anlagen der Eisenbahnsicherungstechnik, da sich diese entgegen der meisten Konsumgüter oder auch der Automobilindustrie durch sehr lange Lebensdauern auszeichnen [SS07]. Um dennoch Lebenszykluskostenanalysen durchführen zu

⁹ Kosten sind definiert als der „bewertete Verzehr von wirtschaftlichen Gütern materieller und immaterieller Art zur Erstellung und zum Absatz von Sach- und/ oder Dienstleistungen“ [Had00].

können, muss sichergestellt werden, dass die Unsicherheit in den Informationen in der Bewertung berücksichtigt sind. Dazu sind sogenannte Sensitivitätsanalysen durchzuführen.

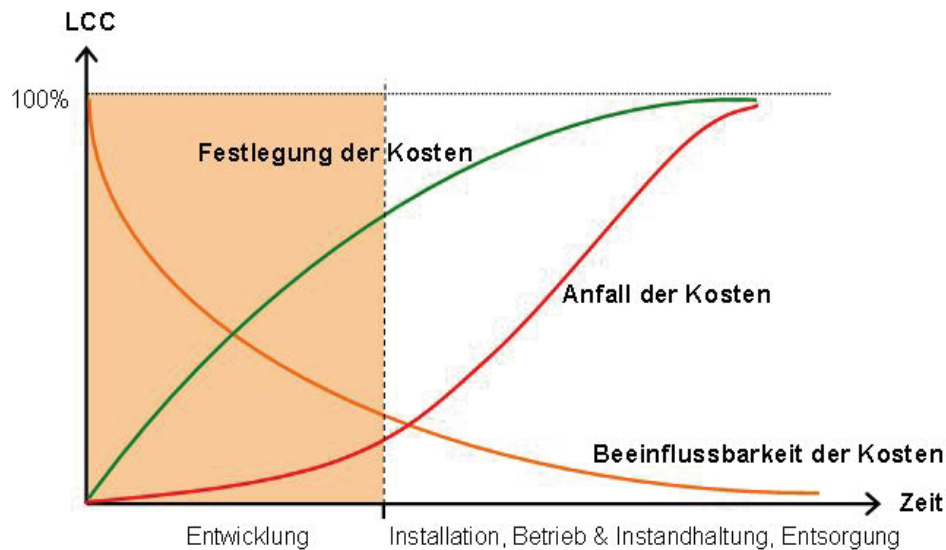


Abbildung 8: Festlegung vs. Entstehung der LCC ([Sch05], S.44)

Sensitivitätsanalysen (Empfindlichkeitsanalysen) gehören zu den Verfahren zur Risikoberücksichtigung bei Investitionsentscheidungen. Dass Investitionsentscheidungen mit Risiko behaftet sind, gilt für die Mehrzahl der Entscheidungssituationen. Vor allem bei langen Betrachtungshorizonten, wie es bei den langlebigen Systemen der Eisenbahnsicherungstechnik der Fall ist, ist das Eintreten bestimmter Kosten- und Nutzengrößen mit Ungewissheit behaftet. Um mögliche Unterschiede zwischen den Zukunftserwartungen und den tatsächlichen Realisierungen abzubilden, eignen sich Sensitivitätsbetrachtungen. Sie ermöglichen im Rahmen von Investitionsrechnungen eine Aussage über die Höhe der Veränderungen des Investitionsrechnungszielkriteriums (hier: Kapitalwert) in Abhängigkeit von Veränderungen bestimmter, in die Berechnung eingehender Größen. Dabei stehen drei verschiedene Ansätze zur Verfügung: der Ansatz der Dreifach-Rechnung, der Zielgrößen-Änderungsrechnung sowie der Kritischen Einflussgrößen-Rechnung. Das hier verwendete Verfahren der Zielgrößen-Änderungsrechnung führt die Sensitivitätsanalyse auf Basis identifizierter, unsicherer Eingangsgrößen aus. Für diese werden mögliche Abweichungen vom Ausgangswert (prozentual) festgelegt und hiernach die Änderung der Zielgröße berechnet. Damit kann eine Aussage hinsichtlich der Empfindlichkeit der Vorteilhaftigkeit der Investitionsstrategie hinsichtlich denkbarer Umfeldveränderungen getroffen und mit den zusätzlich gewonnenen Informationen die Unsicherheit des Entscheidungsproblems verringert werden. ([PS07], S. 112 ff.) ([BLS06], S. 308 ff.) ([Kru07], S. 346 ff.)

Sensitivitätsbetrachtungen sind die Bahnsicherungstechnik von hoher Bedeutung. Sie ermöglichen beispielsweise denkbare Entwicklungen in den Eingangsgrößen Systemlebensdauer, Fahrplan oder Personalstundensatz und deren Auswirkungen auf die LCC und damit den Gesamterfolg der Investitionsstrategie zu erfassen. Dies ist bei der Aufstellung des Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstruments (Abschnitt 3.2) bedacht.

3.1.1.3 Strukturierung der Lebenszykluskosten

Die Erstellung eines Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstruments verlangt nach gründlichen Vorüberlegungen. Dazu zählt vor allem die Kenntnis über die relevanten Kostengrößen, also jenen Kosten die den wirtschaftlichen Erfolg einer Anlage maßgeblich bestimmen. In Anlehnung an die in der DIN EN 60300-3-3 beschriebene Würfeldarstellung der LCC mit den drei Dimensionen Produkt-, Kostenstruktur und Zeit (vgl. [DIN05], S. 14) wurde die in Abbildung 9 dargestellte Strukturierung der Betreiber-LCC vorgenommen. Eine Berücksichtigung der Produktstruktur erfolgt dabei nicht, vielmehr ist das hier abgebildete LCC-„Gerüst“ individuell für die jeweils zu untersuchende Betrachtungseinheit anzupassen. Somit bildet die in Abbildung 9 wiedergegebene Struktur die Grundlage für LCC-Analysen für Systeme der Bahnsicherungstechnik aus Betreibersicht. Die farbliche Differenzierung lässt zwischen einmaligen und wiederkehrenden Kostengrößen unterscheiden. Die wiederkehrenden Kostenbestandteile werden hinsichtlich ihres Betrages in variierend und fest unterteilt.

Anschaffungs-, Besitz- und Entsorgungskosten bilden, angelehnt an die Phasen des Lebenszyklus (vgl. Abbildung 7) die drei Grundsäulen der Lebenszykluskosten aus Betreibersicht. Eine eventuell feinere Gliederung hängt zum einen vom Entscheidungsumfeld ab und zum anderen vom zu bewertenden Produkt bzw. der zu bewertenden Anlage. Die VDI-Richtlinie 2884 bietet eine umfassende Auflistung von möglichen Kosten im Lebenszyklus einer Anlage [VDI05].

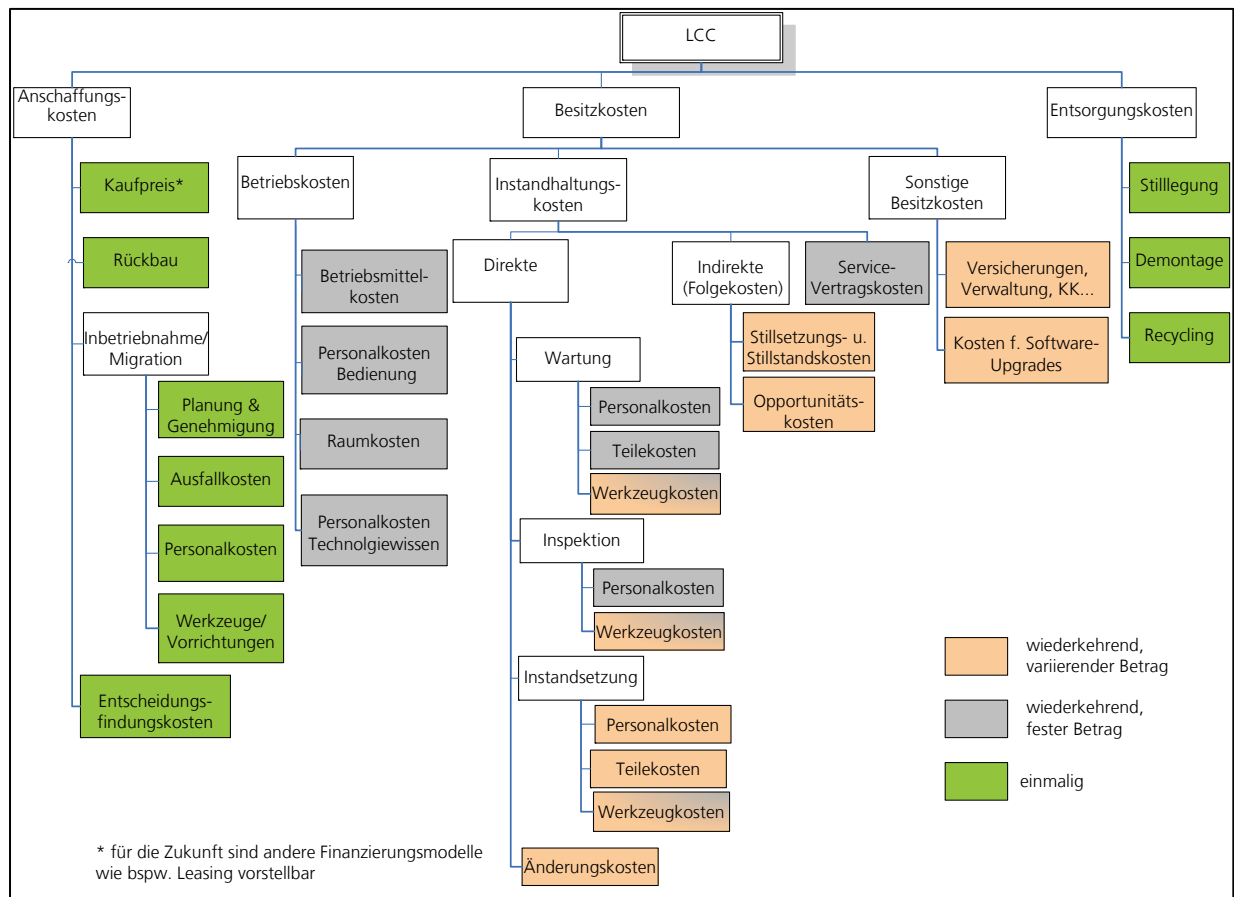


Abbildung 9: Strukturierung LCC

Anschaffungskosten

Anschaffungskosten für Bahnsicherungstechnik setzen sich zusammen aus dem zu zahlenden Kaufpreis, anfallenden Rückbaukosten (falls es sich um eine bestehende Strecke handelt), Migrationskosten (z. B. Kosten für Streckensperrungen bei Systemeinsatz, Kosten für Schulungsmaßnahmen) und Kosten, die mit der Investitionsentscheidung selbst verbunden sind, hier als Entscheidungsfindungskosten bezeichnet. All diese Kostenpositionen haben einmaligen Charakter und fallen zu Beginn der Investition an. Durch ihre zeitliche Nähe zum Entscheidungszeitpunkt sind sie weitestgehend exakt bestimmbar.

Besitzzkosten

Entgegen den Anschaffungskosten fallen die Besitzzkosten über den Einsatzzeitraum verteilt auf und es fällt deshalb oftmals schwer, sie exakt vorherzusagen. Dies gilt im besonderen Maße für Anlagen und Produkte in einem sehr wechselhaften Umfeld. Bei der Bestimmung der Besitzzkosten beruft man sich zumeist auf Erfahrungen, die man mit ähnlichen Anlagen oder aus Prototypentests gesammelt hat.

Zu den Besitzzkosten zählen in erster Linie alle Aufwendungen für den eigentlichen Betrieb der Anlage. Für die Bahnsicherungstechnik machen die Betriebskosten den größten Teil der Besitzzkosten aus. Sie setzen sich zusammen aus den Kosten für Personal (z. B. Fahrdienstleiter), Betriebsmittel (Energie) und notwendige Betriebsräume (z. B. Stellwerksgebäude).

Neben den Betriebskosten beeinflussen die Kosten für notwendige Instandhaltungsmaßnahmen (Wartung, Inspektion und Instandsetzung) und damit verbundene Ausgaben für notwendige Ersatzteile die Besitzkosten in zum Teil erheblichem Umfang ([Ada89], S. 19). Dabei unterscheidet man zwischen direkten und indirekten Instandhaltungskosten. Letztere werden auch als Folgekosten bezeichnet, d.h. Kosten die aufgrund der Nichtverfügbarkeit der Betrachtungseinheit entstehen. Die Zuordnung richtet sich danach, ob die Kosten unmittelbar mit der Instandhaltungsmaßnahme verbunden sind (direkt) oder aufgrund von Folgeereignissen entstehen (indirekt). Direkte Instandhaltungskosten werden durch die konkreten Maßnahmen im Rahmen einer Wartung, Inspektion oder Instandsetzung verursacht. Des Weiteren gehören dazu Kosten, die aufgrund von Änderungen an der Betrachtungseinheit, i. d. R. mit dem Ziel der Anlagenverbesserung bzw. Modernisierung, entstehen. Indirekte Instandhaltungskosten sind im Wesentlichen ggf. notwendigen Betriebsstillständen geschuldet. Beispiele hierfür sind Einnahmeverluste oder Kosten für die Bereitstellung eines Alternativbetriebs (z. B. Schienenersatzverkehr). Folgekosten durch Imageverlust, Rufschädigung oder Prestigeverlust (Opportunitätskosten), wie sie in der DIN EN 60300-3-3 benannt werden, sind in der Regel schwer monetär zu erfassen und damit nur schlecht in den LCC abzubilden. Geeigneter hierfür ist eine qualitative Betrachtung dieser Aspekte. Werden Instandhaltungsleistungen in Form von Serviceverträgen von externen Unternehmen eingekauft, so werden i. d. R. sowohl direkte als auch indirekte Instandhaltungskosten darüber abgerechnet.

Zu den sonstigen Besitzkosten zählen beispielsweise Kosten für Software-Upgrades oder aber auch zu zahlende Versicherungsbeiträge. Die hierzu zählenden Kostenarten sind teilweise stark schwankend und somit in ihrem Umfang über den gesamten Lebenszyklus mit erhöhter Unsicherheit behaftet.

Die Besitzkosten haben unabhängig von ihrer Kategorisierung gemein, dass sie wiederkehrender Art sind (siehe Abbildung 9). Sie werden deshalb in regelmäßigen Zeitabschnitten erfasst. Im Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstrument werden sie auf jährlicher Basis abgebildet (vgl. 3.2.3).

Ausnahme zu den jährlich wiederkehrenden Kosten bilden mitunter die Werkzeugkosten. Sie sind im Falle einer Anschaffung durch das Unternehmen einmalig. Bei Anmietung der Werkzeuge entstehen im Betrag variierende, wiederkehrende Kosten.

Entsorgungskosten

Prinzipiell fallen unter den Posten Entsorgungskosten alle Aufwendungen, die mit der Stilllegung (Außerdienststellung), Demontage und dem Recycling bzw. der sicheren Entsorgung der Betrachtungseinheit verbunden sind. Mitunter greifen hier besondere Umweltgesetze, die bestimmte Recyclingmaßnahmen vorschreiben.

Die geschaffene Struktur der LCC ist die Basis für weitere Betrachtungen und die Auslegung des Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstruments und seiner Schnittstellen zur Eisenbahnbetriebssimulationssoftware (vgl. 3.2.3). Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte mit der einleitend gegebenen Begründung eines erwarteten erheblichen Erkenntniszugewinns eine separate Betrachtung der Instandhaltungskosten, jeweils in Abhängigkeit der Instandhaltungsstrategie für die an der Strecke verbaute Bahnsicherungstechnik. Mit Hilfe von Simulationen sollen

Auswirkungen von Veränderungen im Instandhaltungsmanagement (z. B. Fristenspreizung zwischen regelmäßig erfolgenden präventiven Instandhaltungsmaßnahmen) auf die Systemverfügbarkeit und damit auch auf die Wirtschaftlichkeit der Systeme - gemessen anhand ihrer LCC - betrachtet werden. (siehe Kapitel 4) Entsprechend werden die Instandhaltungskosten nicht als statische Größe in das Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstrument aufgenommen, sondern getrennt analysiert (vgl. Abschnitt 4.7) und erst anschließend mit den Ergebnissen aus dem Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstrument zusammengeführt.

3.1.2 Nutzenbewertung

Für eine vollständige Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von Investitionsentscheidungen müssen nicht nur alle damit verbundenen LCC sondern auch der erzielbare Nutzen erfasst werden. Während Kosten selbst schon monetarisierte Größen sind, und somit direkt als Zahlenwerte in eine Wirtschaftlichkeitsbewertung einfließen können, lässt sich der Nutzen einer Investitionsstrategie vorrangig durch qualitative Parameter beschreiben, deren Erfassung in der Regel mit mehr Bewertungsaufwand verbunden ist. Dies darf jedoch nicht dazu führen, dass auf eine umfassende Nutzenbetrachtung verzichtet wird, und sich anstatt dessen der Entscheider auf die Erfassung rein monetär bewertbarer Nutzenaspekte (z. B. Trassenerlöse) beschränkt. Gerade bei der Bewertung unterschiedlicher Investitionsstrategien in Bahnsicherungstechnik würde man damit den leistungsspezifischen Unterschieden zwischen den Investitionsalternativen¹⁰ nicht gerecht werden. Dies soll mit dem hier entwickelten Bewertungsverfahren beherzigt werden. Ausgangspunkt dabei bildet eine umfassende Analyse bestehender Entscheidungsunterstützungsverfahren [ZG91] [Sch91] [Saa94] [Zan00]. Mittels definierter Bewertungskriterien wurden die Verfahren dahingehend geprüft, wie gut sie die oben benannten Aspekte berücksichtigen. Dabei kristallisierte sich die Erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse (EWA) (vgl. Abschnitt 3.1.3) von ZANGEMEISTER als das geeignetste Entscheidungsunterstützungsverfahren heraus (vgl. [ED07]). Das Verfahren der EWA bildet deshalb im Folgenden die Basis für die Bewertung der möglichen Investitionsstrategien unter Berücksichtigung der LCC.¹¹ Für den Bewertenden bedeutet die Verwendung der EWA, im Rahmen der Nutzenbewertung sowohl den monetär erfassbaren wie monetär nicht erfassbaren Nutzen zu identifizieren. Die Abgrenzung der Nutzenpositionen wird in Abschnitt 3.1.2 erläutert.

¹⁰ Denn bei der Bestellung einer Trasse durch ein EVU interessiert nicht ausschließlich der Preis. In gleicher Weise sind Qualitätskriterien wie die auf der Strecke gebotene Sicherheit und Geschwindigkeit für den Besteller relevant. Dies sind neben dem Fahrpreis jene Kriterien wonach der eigentliche Fahrgast (oder der Logistiker) sein Verkehrsmittel auswählt.

¹¹ Die Eignung dieses Verfahrens als Bestandteil des hier neu entwickelten Bewertungsverfahrens ergab ein ausführlicher Vergleich von Entscheidungsunterstützungsverfahren (siehe [ED07], S. 66 f.). Das von Seiten der öffentlichen Hand verwendete Verfahren zur Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen (siehe [Hei00]) wird als nicht geeignet eingestuft. Grund dafür liegt primär in der hierin praktizierten Überführung der identifizierten, teilweise schwer monetarisierbaren Bewertungsindikatoren in die einheitliche Dimension Geldeinheit. Die Investitionsentscheidung beruht dann fast ausschließlich auf dem damit gewonnenen Zahlenwert (E1-Indikator). Dies suggeriert eine Aussagekraft der gewonnenen Kennzahl, die sie in der Form nicht besitzt. Zudem ist die Art der Monetarisierung (z. B. Geräuschbelastung, Reisezeit) aus betriebswirtschaftlicher Sicht auf ihre Sinnhaftigkeit zu hinterfragen. Eine Überführung eines Verkehrstoten auf die Größe Geld ist zudem aus ethischen Gründen fraglich.

3.1.2.1 Monetär bewertbarer Nutzen

Monetär bewertbarer Nutzen sind die über den Lebenszyklus erzielbaren Erlöse. Er wird in Geldeinheiten erfasst und kann somit direkt den LCC gegenübergestellt werden. So tragen Investitionen in Bahnsicherungstechnik wesentlich zur Nutzbarkeit von Schienenfahrwegen bei. Entsprechend sind ihnen die Erlöse aus Trassenverkäufen¹² anteilmäßig zuzurechnen. Des Weiteren zählen zu dem monetär erfassbaren Nutzen auch mögliche Liquidationserlöse, also Einnahmen die am Ende des Lebenszyklus durch den Verkauf der sicherungstechnischen Anlagen noch erzielt werden können.

3.1.2.2 Nicht-monetär bewertbarer Nutzen

Während der monetär bewertbare Nutzen in der Regel problemlos bestimmt werden kann, gestaltet sich die objektive Beurteilung monetär nicht erfassbarer Nutzenaspekte oftmals als schwierig. Dies liegt zum einen darin begründet, dass die Nutzenkriterien unterschiedlich interpretiert und damit auch bewertet werden können. Eine weitere Ursache für die erhöhte Subjektivität in der Bewertung ist einer mitunter mangelnden Skalierbarkeit der Nutzenkriterien geschuldet. Sie ermöglicht eine unterschiedliche Einschätzung des Erfüllungsgrads der Zielgröße. Ebenso beeinflusst die gewählte Kriteriengewichtung mit der der Bewertende die Wichtigkeit des Kriteriums festlegt das Ergebnis der qualitativen Bewertung (vgl. Abschnitt 6.2.3.4). Um trotz der Gefahren wichtige, verwertbare Aussagen zu erhalten, ist bei diesem Bewertungsschritt im Besonderen Expertenwissen gefragt.

Bei der Identifikation der für Investitionsentscheidungen in Bahnsicherungstechnik relevanten Nutzenaspekte ist die Einordnung dieser in das Gesamtkonzept Schienenverkehr (Kundensicht) notwendig. Die hier geltenden Qualitätskriterien sind im Besonderen

- die Sicherheit,
- die Reisegeschwindigkeit,
- die zeitliche und räumliche Verfügbarkeit,
- die Zuverlässigkeit oder
- die Transparenz der Informationen.

Dabei nimmt die Bahnsicherungstechnik über die Wahl des Betriebsverfahrens¹³ auf einige der Qualitätsaspekte direkten Einfluss. So bilden bei der nutzwertanalytischen Punktebewertung für Bahnsicherungstechnik beispielsweise

- die erreichte Systemsicherheit,

¹² Eine Fahrplantrasse ist die im Fahrplan vorgesehene Inanspruchnahme der Infrastruktur durch eine Zugfahrt [Pac04].

¹³ Für die Umsetzung eines Betriebsverfahrens werden abhängig vom gewählten Verfahren bestimmte Infrastrukturelemente benötigt. Somit definiert sich eine Investitionsalternative in Bahnsicherungstechnik über die Wahl eines Betriebsverfahrens. Ein Betriebsverfahren wird als ein „System betrieblicher Regeln und technischer Mittel zur Durchführung von Fahrten mit Eisenbahnfahrzeugen auf einer Eisenbahninfrastruktur“ verstanden ([NP04], S. 33).

- die maximal mit dem Betriebsverfahren mögliche Streckengeschwindigkeit oder
- die Güte, mit der Verspätungen im Streckenabschnitt mit dem Betriebsverfahren abgebaut werden können

zu bewertende, qualitative Nutzenaspekte (vgl. Kapitel 6). [FKH03]

Wie eine solche qualitative Bewertung durchzuführen ist, soll an dieser Stelle nicht tiefer gehend beschrieben werden. Zum einen wird zur Erläuterung auf das Fallbeispiel (siehe Kapitel 6) verwiesen. Zum anderen geben eine Vielzahl von Fachbüchern umfassende Verfahrensbeschreibungen [Sch91] [Zan76] [Zan00] [PB00].

3.1.3 Zusammenführende Bewertung

Um sowohl die quantitativen wie auch die qualitativen Erfolgsgrößen für die Investitionsentscheidung gemeinsam aufzubereiten, sind die klassischen Ansätze der Investitionsrechnung unzureichend. Den ihnen inhärenten Mangel einer Analyse rein qualitativer Größen greift ZANGEMEISTER auf und schafft mit der Erweiterten Wirtschaftlichkeitsanalyse (EWA) [ZAN00] hierzu eine Lösung, auf die im Rahmen dieser Arbeit zurückgegriffen wird.

Abbildung 10 zeigt schematisch das prinzipielle Vorgehen der zweischichtigen EWA¹⁴. [Zan00] [Met77]

Um mit Hilfe der EWA zu einer fundierten Investitionsentscheidung zu gelangen, muss sowohl eine finanzanalytische (orientiert sich an den traditionellen Methoden der Investitionsrechnung) als auch eine nutzwertanalytische Bewertung vorgenommen werden.

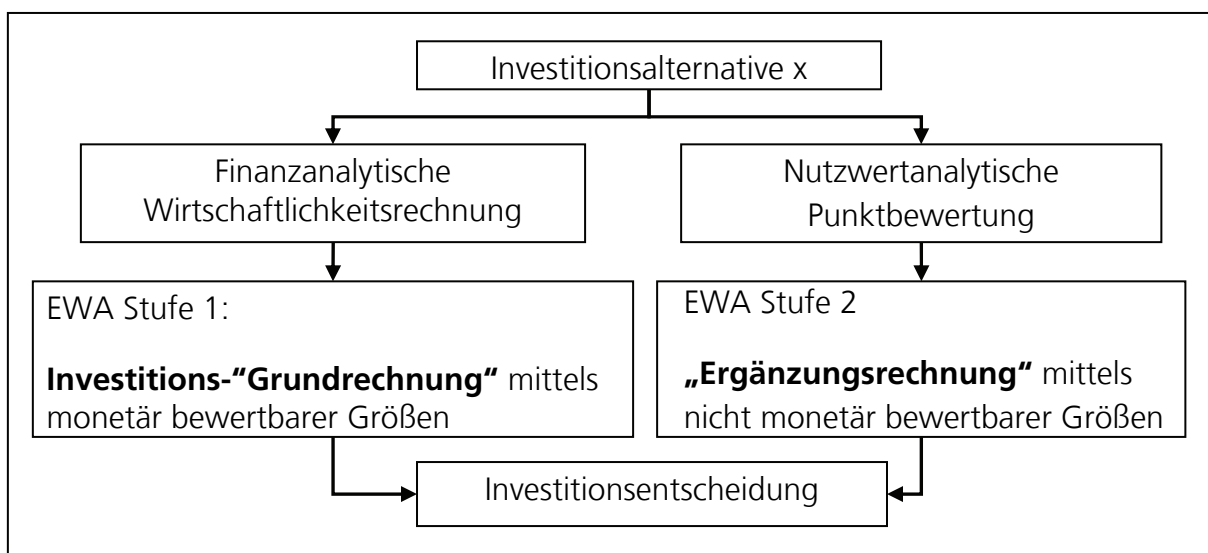


Abbildung 10: 2-Stufen-Verfahren zur EWA

¹⁴ Auf die Anwendung des Drei-Stufen-Verfahrens zur EWA nach ZANGEMEISTER wird an dieser Stelle verzichtet. Eine Differenzierung zwischen direkt und indirekt monetären Größen ist an dieser Stelle zur Entscheidungsunterstützung nicht notwendig. Alle monetarisierbaren Effekte sind in einer Stufe zusammengeführt.

In der finanzanalytischen Wirtschaftlichkeitsrechnung werden zunächst alle monetär bewertbaren Kosten- und Nutzenaspekte (direkt und indirekt) erfasst und bewertet. Für eine Zusammenführung der quantitativen Kosten- und Nutzengrößen empfiehlt sich die Kapitalwertmethode (Gegenwartsmethode).¹⁵ Die Kapitalwertmethode gehört zu den dynamischen, d. h. mehrperiodischen Investitionsrechenverfahren¹⁶. Dieses Verfahren eignet sich im Rahmen dieser Arbeit besonders gut, da anhand des dabei berechneten Barwerts¹⁷ (C_0) eine nachvollziehbare Aussage über die Vorteilhaftigkeit der Alternative getroffen werden kann. Außerdem erlaubt die Kapitalwertmethode die Abbildung der vielen, über den Bewertungszeitraum verteilten Kosten- und Nutzengrößen (vgl. Abbildung 11) in einer Kennzahl und ermöglicht damit eine gute Vergleichbarkeit der bewerteten Investitionsstrategien. Daneben wird durch die Ermittlung des Barwerts der Kosten- und monetarisierbaren Nutzenpositionen der geringeren finanziellen Bedeutung zeitlich später auftretender Zahlungsströme zum Planungszeitpunkt Rechnung getragen. Die Abzinsung erfolgt anhand der sogenannten Abzinsungsfaktoren¹⁸. Dabei wird der Zeitwert mit dem Abzinsungsfaktor multipliziert, um den Wert des Zeitwertes zum Planungszeitpunkt zu ermitteln. Abbildung 11 verdeutlicht den Zusammenhang.

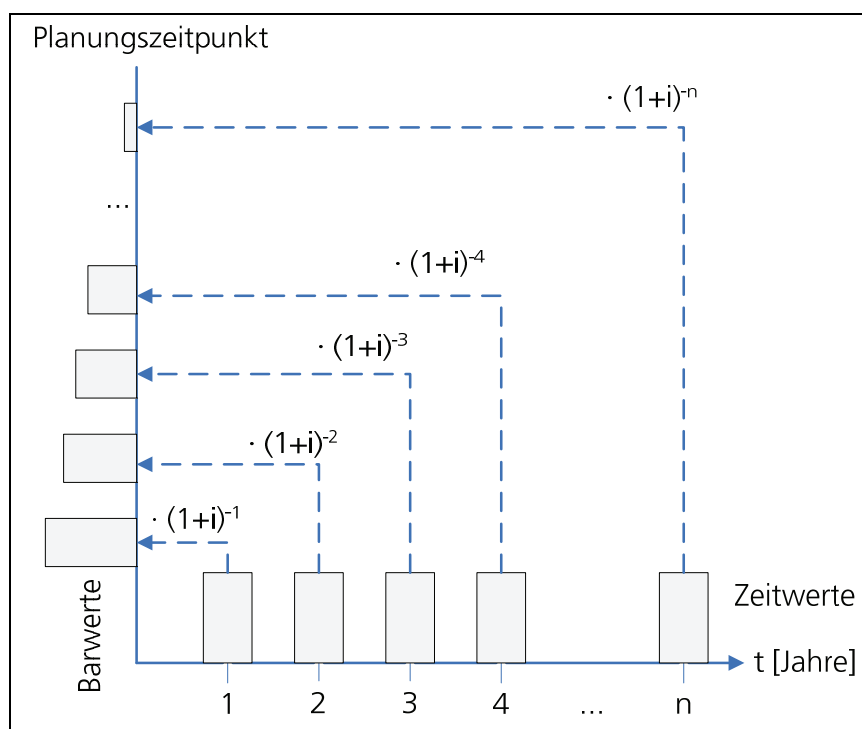


Abbildung 11: Zeitwert versus Barwert

¹⁵ Damit wird im Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstrument eine Form der Kosten-Nutzen-Untersuchungen umgesetzt. Für diese gilt generell, dass sie durch eine systematische Gegenüberstellung von positiven und negativen Wirkungen von Planungsvorhaben eine rational begründete Beurteilung ermöglichen.

¹⁶ Für eine umfassende Verfahrensbeschreibung siehe ([Sei01], S. 80 ff.), ([BLS06], S. 47 ff.) und ([Kru07], S. 44 ff.)

¹⁷ Barwert ist der Wert der Zahlungsströme im Bezugszeitpunkt. Dieser ist i. d. R. der Investitionszeitpunkt.

¹⁸ Abzinsungsfaktoren können in den Zinstabellen u. a. in [BLS06] [Sei01] nachgeschlagen werden

Der Kapitalwert (siehe Formel [1]) der einzelnen Investitionsstrategien ermittelt sich aus der Differenz der Anschaffungsausgaben (I_0) und den für die einzelnen Betriebsjahre 1 bis n ermittelten Barwerte der jährlichen Differenzen aus quantifizierbarem Nutzen (Einzahlungen) und Kosten. Wesentlicher Einflussparameter stellt dabei der gewählte Kalkulationszinssatz i dar, der sich an den unternehmensinternen Vorgaben und den prognostizierten Entwicklungen am Kapitalmarkt orientiert. Eine Investitionsalternative ist dann vorteilhaft, wenn C_0 einen Wert größer 0 erreicht. Trifft dies für mehrere Alternativen zu, dann ist jene mit dem höchsten C_0 -Wert die wirtschaftlichste Möglichkeit. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich die Erfolgswirksamkeit einer Investitionsstrategie und damit die Höhe des Kapitalwerts C_0 durch

- die Höhe der Einzahlungen (E) und Kosten (K),
- dem Zeitpunkt t der Entstehung von Einzahlungen und Kosten und
- dem Kalkulationszinssatz i

bestimmen.

$$C_o = I_o + \sum_{t=1}^n (E_t - K_t) \times \frac{1}{(1+i)^t} = \sum_{t=0}^n (E_t - K_t) \times \frac{1}{(1+i)^t} \quad [1]$$

mit

C_0 - Kapitalwert

I_0 - Anschaffungsausgaben

E_t - Einzahlungen zum Zeitpunkt t , $t=1, \dots, n$

K_t - Kosten zum Zeitpunkt t , $t=1, \dots, n$

i - Kalkulationszinssatz

Die oft diskutierte Steigerung des Preisniveaus (Inflation) soll hier nicht gesondert betrachtet werden. Vielmehr ist bei der Prognose der zukünftigen Zahlungsströme die Geldentwertung mit zu berücksichtigen. Zudem wird unterstellt, dass der in Formel [1] verwendete nominale interne Zinssatz i unter Kenntnis der zu erwartenden Geldentwertungsrate¹⁹ festgelegt wird. ([PS07], S. 78), ([BLS06], S. 119 ff.)

Schwieriger gestaltet sich die zweite Bewertungsstufe, in der die monetär nicht bzw. schwer erfassbaren Größen zu bewerten sind. Für die Durchführung der hier vorgesehenen nutzwertanalytischen Punktebewertung muss neben der Festlegung der relevanten Nutzenaspekte eine

¹⁹ Die Geldentwertungsrate drückt den prognostizierten Wert der jährlichen Steigerung des Preisindex für die betreffende Gütergruppe während des Betrachtungszeitraums aus. ([BLS06], S. 119)

möglichst objektive Bewertung dieser realisiert werden. Entscheidend hierfür sind die geeignete Wahl von Zielwertfunktion und Kriteriengewichtungen [Zan00]. Auf eine detaillierte Beschreibung der nutzwertanalytischen Punktebewertung wird aufgrund des hohen Grades an Fallspezifika an dieser Stelle verzichtet und auf das Fallbeispiel in Kapitel 6 verwiesen.

Eine kompakte und übersichtliche Aufbereitung der mit den beiden Stufen gewonnenen Ergebnisse bieten sogenannte Nutzwertportfoliodarstellungen. Die Erkenntnisse aus quantitativer und qualitativer Bewertung werden hierbei in Form einer Matrix direkt einander gegenübergestellt. Durch die dabei beibehaltene Trennung von vorwiegend sicheren monetären Entscheidungsgrößen und den mit erhöhter Unsicherheit und Subjektivität behafteten qualitativen Größen kann der Verantwortliche in Abhängigkeit der unternehmerischen Präferenzen die beiden Aspekte gleich oder unterschiedlich stark in seine Auswahlentscheidung einbeziehen.

An dieser Stelle wird sich auf eine rein verbale Beschreibung des Verfahrens zur Bewertung von Investitionsstrategien beschränkt. Zur Verdeutlichung der Bewertungsmethodik soll das Fallbeispiel in Kapitel 6 dienen. Doch entgegen der EWA erfolgt die Investitionsentscheidungsempfehlung bei Durchführung der integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien nicht bereits nach Durchführung der Investitions-„Grundrechnung“ und der „Ergänzungsrechnung“. Vielmehr schließt sich diesen beiden Bewertungsschritten eine umfassende Bewertung von Instandhaltungsstrategien an. Erst dann wird eine endgültige Investitionsentscheidungsempfehlung gegeben (vgl. Kapitel 1).

Im Folgenden Abschnitt werden aufbauend auf den theoretischen Grundlagen die Aufgabe von Eisenbahnbetriebssimulationen im Rahmen einer Investitionsstrategiebewertung sowie Aufbau und Funktionsweise des Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstruments erläutert.

3.2 Eisenbahnbetriebssimulation zur Wirtschaftlichkeitsbewertung

Die Verbindung von Eisenbahnbetriebssimulationen und einer Wirtschaftlichkeitsbewertung von Investitionsstrategien ist in der Form neu. Lediglich [Lie07] erarbeitete erstmals ähnliche Ansätze.²⁰ Eine solche Verbindung ist naheliegend, da zum einen die Wirtschaftlichkeit des Infrastrukturbetriebs wie oben benannt immer mehr in den Fokus der Managementbetrachtungen rückt, und zum anderen bei der Durchführung von Eisenbahnbetriebssimulationen etliche Daten erzeugt werden, die für eine solche Bewertung sinnvoll genutzt und durch eine entsprechende Kopplung von einem aufzustellenden Bewertungsinstrument und Eisenbahnbetriebssimulationen wiederverwendet werden können. Für die Entwicklung eines solchen Bewertungsinstruments (vgl. Abschnitt 3.2.3) sind zuvor

1. die entscheidungsrelevanten Bewertungskriterien festzulegen (vgl. Abschnitt 3.2.1) sowie

²⁰ LINAU setzt dabei eine globale Infrastrukturbewertung um. Im Gegensatz dazu erfolgt hier eine detaillierte, auf die Bahnsicherungstechnik beschränkte Bewertung.

2. eine zu deren Ermittlung geeignete Eisenbahnbetriebssimulation zu bestimmen (vgl. Abschnitt 3.2.2).

3.2.1 Bewertungskriterien

Die für die Bewertung von Investitionsstrategien relevanten Bewertungskriterien richten sich nach dem Ziel der Analyse. So werden im Rahmen einer vergleichenden Bewertung von Investitionsalternativen nur veränderliche Aspekte berücksichtigt. Auf konstante Parameter, also jene, die sich nicht durch die Wahl einer Bahnsicherungstechnik verändern, kann dann verzichtet werden. Sie liefern bei allen Investitionsstrategien den gleichen Beitrag zu Kosten bzw. Nutzen. So kann bspw. bei der Bewertung von alternativen Investitionsstrategien in Bahnsicherungsanlagen für einen konkreten Netzabschnitt bei gefordertem Fahrplan (vgl. Kapitel 6) auf Informationen hinsichtlich der Erlöse aus dem zu erfüllenden Fahrplan²¹ verzichtet werden. Gleiches gilt bei konstanter Gleistopologie für die Erfassung von Oberbaukosten. Damit wird deutlich, dass das primäre Ziel der hier beschriebenen integrierten Bewertung der Vergleich von Investitions- und Instandhaltungsalternativen ist. Weniger geht es darum, Aussagen über die absolute Kosten- bzw. Erfolgswirksamkeit der einzelnen Alternativen zu erhalten.

Unabhängig von dem Ziel der Analyse sind jedoch prinzipiell zunächst all jene Bewertungskriterien zusammenzutragen, die eine umfassende Lebenszyklusanalyse ermöglichen. Entsprechend müssen alle relevanten Kosten- und Nutzenaspekten (Abschnitte 3.1.1 und 3.1.2) im Bewertungsinstrument abgebildet sein.

Die für eine Bewertung von Investitionsstrategien in die Bahnsicherungstechnik relevanten Kosten²² sind (vgl. Abbildung 9):

1. Anschaffungskosten
2. Rückbaukosten
3. Betriebskosten²³
4. Entsorgungskosten

Dabei sind die Entsorgungskosten im Lebenszyklus von Systemen der Eisenbahnsicherungstechnik von untergeordneter Bedeutung. Dies liegt vor allem daran, dass bei Einsatzzeiträumen der Anlagen von mindestens 25 Jahren der Einfluss der Kosten für die Anlagenentsorgung auf das Gesamtergebnis durch die starke Abzinsung (vgl. Abbildung 11) vergleichsweise gering ist. Des Weiteren kann bei Entsorgungskosten aufgrund der Informationsunsicherheit nur mit groben Abschätzungen gearbeitet werden.

²¹ Sollte durch eine Investitionsalternative aus technischer Sicht eine Steigerung des Verkehrsvolumens möglich sein, so wird dies im Rahmen der qualitativen Nutzenbewertung berücksichtigt. Eine Monetarisierung ist nicht möglich, da dies eine entsprechende Nachfrage nach mehr Verkehrsleistungen voraussetzt.

²² Die einzelnen Kostenpositionen können nur Circa-Werte sein; Ausnahme bilden die Anschaffungsausgaben, die anhand der Angebots- bzw. der Ausschreibungsunterlagen genau beziffert werden können.

²³ Die Instandhaltungskosten werden getrennt hiervon bewertet (vgl. Abschnitt 4.7)

Für die Erlösstruktur können je nach Bewertungsabsicht

1. Erlöse aus Trassenverkäufen und
2. Liquidationserlöse²⁴

relevant sein.

Daneben spielen Subventionen in der praktischen Alternativenbewertung eine entscheidende Rolle. Konsequenterweise sollten sie in einem Bewertungsinstrument aus Sicht des Infrastrukturunternehmens berücksichtigt werden. Gleichzeitig sei angemerkt, dass dadurch die Aussage zugunsten stärker subventionierter Techniken verzerrt wird.

Bei der Definition der Nutzenaspekte muss es gelingen, die qualitativen Unterschiede der Investitionsstrategien mit Blick auf das Bewertungsziel zu erfassen. Dies bedeutet, dass beispielsweise im Rahmen eines Alternativenvergleichs unterschiedliche Streckenhöchstgeschwindigkeiten oder die Systemreaktion auf Störungen im Betriebsablauf eine Rolle spielen. Bedarf es möglicherweise bestimmter On-board-Systeme, um als EVU die Strecke nutzen zu können, so muss dies ebenfalls berücksichtigt werden. Damit wird auch deutlich, dass unter dem Begriff „Nutzen“ nicht die alleinige Erfassung von „Mehrwert“ schaffenden Faktoren zu verstehen ist. Vielmehr wird mit den Nutzenaspekten die Qualität des Investitionsszenarios beschrieben. Sie bestimmen neben den Trassenentgelten die Attraktivität der Strecke für ein Eisenbahnverkehrsunternehmen und nehmen damit Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Streckenbetriebs für ein EIU.

Eine pauschale Auflistung von relevanten Nutzenkriterien, die es in ein solches Bewertungsinstrument zu integrieren gilt, ist dabei nicht zielführend. Die Relevanz möglicher qualitativer Erfolgskriterien wie bspw. Kapazitätsüberschuss, maximale Streckengeschwindigkeit, Umgang mit Störereignissen oder die Möglichkeit der Zuglaufverfolgung ist abhängig vom Untersuchungsraum. Entsprechend sind die Nutzenkriterien fallspezifisch zu definieren und zu bewerten.

3.2.2 Eisenbahnbetriebssimulation

Mit Eisenbahnbetriebssimulationen²⁵ wird der Schienenverkehr mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell nachgebildet. Es erfolgt die Betrachtung des Zeitverhaltens des Systems, um Aussagen über die bei vorgegebener Belastung erreichbare Betriebsqualität zu erhalten ([Pac04], S. 154). Dies unterstreicht den hohen Grad an Nutzenstiftung bei Integration der Erkenntnisse aus Eisenbahnbetriebssimulationen in den Prozess der Bewertung von Investitionsstrategien für die Bahnsicherungstechnik. Denn die Aussagen hinsichtlich der Betriebsqualität spielen eine wesentliche Rolle bei der Bewertung des monetär nicht erfassbaren Nutzens (vgl. Abschnitt 3.1.2.2).

²⁴ Liquidationserlöse treten ein, wenn nach Ende der Lebensdauer oder des Bewertungszeitraums noch Erlöse aus dem Verkauf oder der Weiternutzung der bestehenden Anlagen erzielbar sind.

²⁵ „Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Realität übertragbar sind.“ [VDI96]

Die Wahl eines Simulationsverfahrens und damit auch einer Simulationssoftware bestimmt sich durch die in Abschnitt 3.2.1 erarbeiteten Anforderungen. Mit der dort aufgestellten Forderung nach einem möglichst realistischen Bild des Eisenbahnbetriebs empfehlen sich zum einen die Verwendung des synchronen Simulationsverfahrens und zum anderen eine mikroskopische Infrastrukturmodellierung. Bei synchronen Simulationsverfahren werden entgegen der asynchronen Simulation die zeitsynchron ablaufenden Prozesse unmittelbar, also in ihrer tatsächlichen Abfolge nachgebildet. Damit wird eine äußerst realistische Abbildung des Betriebsablaufs ermöglicht, bei der die Anzahl sowie der Zustand der im System vorhandenen Züge jener auf der tatsächlichen Strecke entsprechen ([Pac04], S. 156). Der für die zu untersuchende Strecke zu erfüllende Fahrplan kann dabei als Eingangsgröße verwendet werden. Um sich einen Eindruck über den notwendigen Investitionsumfang an der Strecke machen zu können, bedarf es einer Detailbetrachtung der Strecke in Form eines mikroskopischen Knoten-Kanten-Modells. Entgegen makroskopischer Infrastrukturmodelle erfolgt hierbei keine Aggregation oder Mittelwertbildung an den Knoten und Kanten ([Rad06], S. 8f.). Vielmehr erfolgen eine realitätsgetreue Abbildung des Sicherungssystems und eine exakte Fahrzeitrechnung. Damit können eine Vielzahl von eisenbahnbetrieblichen Fragestellungen adressiert werden, so z. B. der Aspekt der Betriebsqualität durch Simulation von Störszenarien im konfliktfreien Fahrplan.

RailSys®²⁶ ermöglicht synchrone, mikroskopische Eisenbahnbetriebssimulationen²⁷. Es wurde im Rahmen dieser Arbeit ausgewählt, da damit die Anforderungen an die Schnittstellengestaltung und die benötigten Informationen zur Bewertung von Investitionsstrategien weitestgehend erfüllt werden können. Eingangsdaten für Simulationen in RailSys® sind Infrastruktur, Fahrpläne, Fahrzeug- und betriebliche Daten, mit dem primären Ziel der Fahrzeitrechnung und Konflikterkennung ([Rad06], S. 55). Mittels der Eisenbahnbetriebssimulationen werden durch das Einbringen von Störungen in den konfliktfreien Fahrplan Stabilität und Qualität der Fahrpläne bei gegebener Infrastruktur analysiert. Ebenso werden Untersuchungen hinsichtlich der Möglichkeiten für zusätzliche Verkehre in einem bestehenden Fahrplan durchgeführt. Die so gewonnenen Aussagen bezüglich der zu erwartenden Betriebsrealität sind ein wichtiger Eingangsparameter für die Investitionsstrategiebewertung (vgl. Kapitel 1 und 6). Wichtig hierbei sind die Definition betrieblich sinnvoller Störszenarien, wie bspw. Haltezeitverlängerungen in Bahnhöfen, den Ausfall von Infrastruktur oder zeitlich beschränkter Langsamfahrstellen und realistischer Zusatzverkehre. Das prinzipielle Vorgehen zu deren Simulation in RailSys® ist ausführlich in ([Rad06], S. 72 ff.) beschrieben.

3.2.3 Instrument zur Wirtschaftlichkeitsbewertung

Nach Festlegung der Bewertungskriterien (siehe Abschnitt 3.2.1) und der Simulationsumgebung (siehe Abschnitt 3.2.2) werden nun das eigentliche Bewertungsinstrument sowie die

²⁶ RailSys® ist ein Fahrplan- und Infrastrukturmanagementsystem der Firma RMCon GmbH. Es ermöglicht die Abbildung und Simulation großer Netze [Rai04] [Rai06]

²⁷ Daneben ermöglicht RailSys® deterministische Fahrplansimulationen, die die Grundlage für Betriebssimulationen bilden und mit denen sich detaillierte Betriebszustände betrachten (z. B. Langsamfahrstellen, Ausfall von Infrastrukturkomponenten) und Aussagen zu geeigneten Maßnahmen treffen lassen ([Rad06], S. 59 ff.).

notwendigen Schnittstellen zur Betriebssimulationssoftware beschrieben. Es ist dabei wichtig, dass es mit dem Bewertungsinstrument gelingt, zum einen den kompletten Lebenslauf der einzelnen sicherungstechnischen Anlagen in geeigneter Form zu erfassen (siehe hierzu Abschnitt 3.1.1) und zum anderen die Detailtiefe der Bewertung entsprechend dem Ziel der Investitionsentscheidung zu wählen. Unter dieser Prämisse erfolgt die Bewertung der Investitionsalternativen auf Basis der im zu analysierenden Netzabschnitt (Bewertungsraum) verbauten Systeme; eine Aufgliederung der Systeme in ihre Komponenten (vgl. [DIN05]) wäre hier zu detailliert. Auf Systemebene lassen sich wichtige Aussagen zu den Lebenszykluskosten treffen und wesentliche Erkenntnisse zu den Kostentreibern bzw. kostentreibenden Lebensphasen gewinnen. Die notwendige Transparenz für die Investitionsentscheidung kann damit geschaffen werden.

Für die Auslegung der Schnittstellen gilt, dass alle für die Bewertung der Investitionsalternativen relevanten Mengen-, Zeit- und Leistungsdaten sowie Informationen über die Betriebsqualität aus den Simulationsläufen zu gewinnen sind. Diese umfassen

- Angaben zu Anzahl und Art der Bahnsicherungsinfrastruktur,
- Betriebsdauer,
- Fahrplan (Anzahl und Art der Züge) und
- Verspätungen.

Für diese Punkte werden die gesammelten Daten aus der Simulationsumgebung in das Bewertungsinstrument importiert und in Abhängigkeit ihres Informationsgehalts in die finanzanalytische Grundrechnung oder nutzwertanalytische Punktebewertung (vgl. Abschnitt 3.1.3) übernommen. Damit können bereits vorhandene und zuvor in die Simulationsumgebung gepflegte Informationen wiederverwendet werden und der Arbeitsaufwand für eine Investitionsbewertung reduziert sich je nach Umfang des Bewertungsraums mitunter erheblich.

Neben diesen dynamischen Größen, also von der Wahl der Investitionsstrategie abhängigen Daten, werden für eine Wirtschaftlichkeitsaussage zusätzliche, von der jeweiligen Strategie unabhängige Informationen benötigt. Beispiele hierfür sind

- Stundensatz Betriebspersonal,
- Anschaffungspreise,
- Kalkulationszinssatz,
- Rückbaukosten (elementbezogen) etc.

Für diese nicht aus den Simulationsläufen zu gewinnenden Informationen sind im entwickelten Instrument notwendige Eingabefelder in einer Eingabemaske vorgesehen. Darüber können die, in der Regel sehr unternehmensspezifischen Daten direkt in der Bewertung verarbeitet werden.

Mit den aus der Simulation und über die Eingabemaske gewonnenen Daten liegen dem Anwender alle notwendigen Informationen für eine Investitionsstrategiebewertung vor. In Abhängigkeit von der verbauten Technik ist die Lebensdauer im Instrument zu hinterlegen. Für diese erfolgen Lebenszykluskostenbetrachtung und Nutzenbewertung in Form der EWA (vgl.

Abschnitt 3.1). Entsprechend des hier verfolgten Ansatzes einer separaten Instandhaltungsstrategiebewertung werden die mit der Instandhaltung verbundenen Kosten im ersten Schritt der Investitionsstrategiebewertung nicht berücksichtigt. Prinzipiell können diese Kostenpositionen auch direkt im Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstrument berücksichtigt werden. Dies empfiehlt sich jedoch nur bei starren und damit leicht abschätzbaren Instandhaltungsaufwendungen. Für die Bahnsicherungstechnik ist letzteres nicht zutreffend. Im nun folgenden Kapitel 4 werden die für eine Instandhaltungsstrategieanalyse notwendigen Bausteine erläutert.

4 Instandhaltungsstrategien

Die Wahl der wirtschaftlich sinnvollsten Instandhaltungsstrategie ist von hohem wirtschaftlichem Stellenwert. Dabei handelt es sich bei diesen Entscheidungen unabhängig von dem Betrachtungsobjekt um eine komplexe Entscheidung. Besonders im Bereich der Bahnsicherungstechnik, die neben ihren langen Lebensdauern und hohen Sicherheits- und Verfügbarkeitsansprüchen eine räumlich verteilte Struktur aufweist, gestaltet sich diese Aufgabe als vielschichtiges Optimierungsproblem. Gleichzeitig lassen Analysen Optimierungsmöglichkeiten in der Instandhaltung der Bahnsicherungstechnik erwarten [KR01]. Ob und wie diese in Abhängigkeit der Investitionsstrategie ausfallen, gilt es zu untersuchen.

Es sollen zunächst die wesentlichen Grundlagen zur Zuverlässigkeits- und Instandhaltungstheorie (Abschnitte 4.1, 4.2 und 4.3) und die prinzipiellen Möglichkeiten bei der Gestaltung und Auswahl einer Instandhaltungsstrategie (Abschnitte 4.4 und 4.5) dargelegt werden. Mit einem kurzen Einblick in die aktuelle Instandhaltungspraxis im Bereich der Eisenbahnsicherungstechnik (Abschnitt 0) wird die Motivation für eine auf Simulationsmodellen basierende Abbildung und Bewertung von Instandhaltungsstrategien für diese Anlagengruppe geschaffen. Dies wird in Abschnitt 4.7 detailliert erläutert.²⁸

4.1 Zuverlässigkeitstheorie

Zur Definition von Instandhaltungsstrategien und den damit verbundenen Instandhaltungsmaßnahmen ist die Kenntnis über die wesentlichen Zusammenhänge der Zuverlässigkeitstheorie und einer Lebensdauerabschätzung unablässig. An dieser Stelle sollen nur die grundlegenden Zusammenhänge benannt werden. Vorhandene Nachschlagewerke vermitteln ein tiefer gehendes Sachverständnis [BL04] [Fis90] [RH04] [Bei93] [Bir07] und brauchen hier nicht wiederholt zu werden.

Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit einer Komponente, dass sie ihre Funktion in der erwarteten Weise unter vordefinierten Betriebsbedingungen zu einem bestimmten Zeitpunkt t wahrnimmt. Dabei wird insbesondere bei komplexen Anlagen eine Differenzierung in Komponenten-, Subsystem- und Systemzuverlässigkeit vorgenommen. Als Komponente wird im Rahmen der Instandhaltung die kleinste reparierbare bzw. ersetzbare Einheit verstanden. Subsysteme umfassen eine größere Anzahl solcher Komponenten und bilden in Summe das System bzw. die gesamte Anlage. Die zu wählende Abgrenzung zwischen den Komponenten und Subsystemen aus Sicht der Instandhaltung ist abhängig von der betrachteten Anlage und ihrem technischen Aufbau.

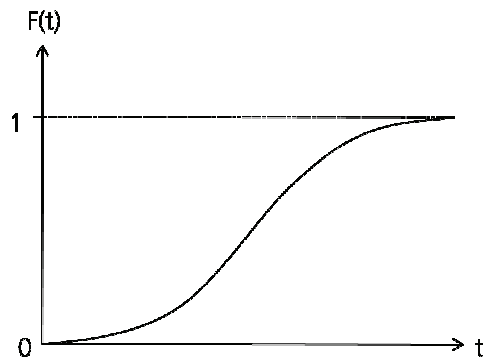
Die Zuverlässigkeitstheorie setzt somit auf der Annahme auf, dass alle Einheiten zu einem gewissen Zeitpunkt nicht mehr ihre Funktion wahrnehmen können, damit als defekt gelten

²⁸ In den folgenden Kapiteln folgt eine Vielzahl neuer Begrifflichkeiten. Eine Zusammenstellung detaillierter Begriffsdefinitionen erfolgt im Anhang A.

und ihr Lebensende erreicht haben. Da eine genaue Bestimmung des Ausfallzeitpunkts nie möglich ist, können Aussagen zu Systemzuverlässigkeit nur in Form von Wahrscheinlichkeiten getroffen werden. [DIN90] Für die Bewertung der Zuverlässigkeit von Einheiten und Systemen sind folgende Kennzahlen relevant:

- Ausfallfunktion $F(t)$ – gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass die betrachtete Einheit im Zeitintervall $[0;t]$ ausfällt, d. h. die Lebensdauer T kleiner bzw. gleich t ist:

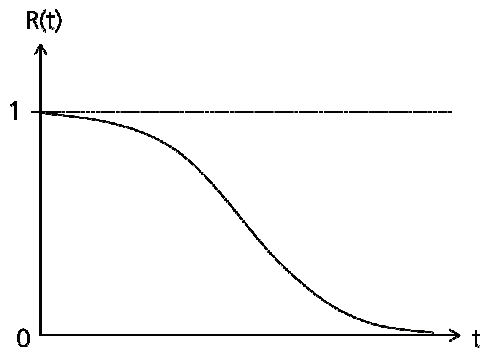
$$F(t) = P(T \leq t) \quad [2]$$



- Zuverlässigkeitsfunktion $R(t)$ – gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass die betrachtete Einheit bis zur Zeit t intakt ist:

$$R(t) = P(T > t) \text{ bzw.} \quad [3]$$

$$R(t) = 1 - F(t) \quad [4]$$



- $f(t)$ ist die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion. Sie wird bestimmt durch die im Beanspruchungsintervall ausgefallenen Betrachtungseinheiten, dem Anfangsbestand sowie dem dazugehörigen Beanspruchungsintervall. Mathematisch beschreibt es sich durch das Differential der Ausfallfunktion $F(t)$.

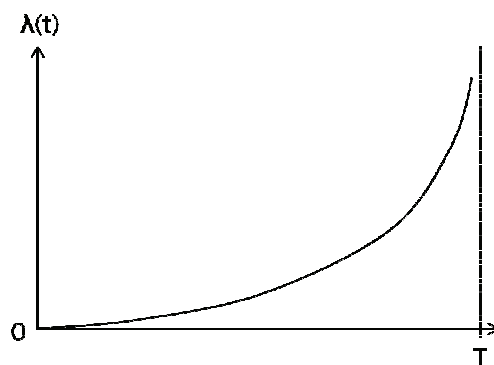
$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

- Ausfallrate $\lambda(t)$ – gibt die Anzahl der im Beanspruchungsintervall Δt ausgefallenen Betrachtungseinheiten an, bezogen auf den funktionsfähigen Anfangsbestand zu Beginn des Zeitintervalls $N(t)$. Für die Ausfallrate gilt (siehe Formel [5]):

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) * \Delta t} = \frac{\frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)}}{\frac{\Delta t}{N(t)}} \quad [5]$$

mit $\Delta t \rightarrow 0$ folgt daraus

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{-R'(t)}{R(t)} = \frac{F'(t)}{1 - F(t)}$$



- Mittlere Lebensdauer $E(T)$ – mittlere Zeit bis zum ersten Ausfall der Betrachtungseinheit bzw. als mittlere Betriebszeit zwischen Beanspruchungsbeginn und dem Ausfall bezeichnet:

$$E(T) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad [6]$$

Bei einer konstanten Ausfallrate wird $E(T)$ der Kennzahl MTBF (Mean Time

Between Failure) gleichgesetzt. Konstante Ausfallraten gelten vorrangig bei elektronischen Bauteilen, vor allem mechanische Systeme weisen eine zeitlich veränderliche Ausfallrate auf²⁹.

- Abnutzungsvorrat $AV(t)$ – ist nach DIN 31051 der „Vorrat der möglichen Funktionserfüllung unter festgelegten Bedingungen“ (vgl. Abbildung 13)

$$AV(t) = \int_t^{t_{\max}} R(t) dt \quad [7]$$

²⁹ Konstante Ausfallraten beschreiben den Bereich des „Badewannenbodens“ in der sogenannten Badewannenkurve. Die Badewannenkurve wird durch die Ausfallrate $\lambda(t)$ beschrieben und unterteilt das Leben einer Anlage in die Zeit der Frühausfälle, der Zufallsausfälle und der Spätausfälle. Frühausfälle sind der Unreife des Systems geschuldet. Zufallsausfälle charakterisieren den Normalbetrieb. Spätausfälle sind ein Indikator für einen angestiegenen Abnutzungsgrad des Systems und eine baldig zu erfolgende Systemerneuerung.

Damit wird deutlich, dass über $R(t)$ ein mathematischer Zusammenhang zwischen der Ausfallrate $\lambda(t)$ und dem Abnutzungsvorrat $AV(t)$ besteht. Eine Minderung des Abnutzungsvorrats bedeutet entsprechend [7] eine sinkende Systemzuverlässigkeit $R(t)$. Damit verbunden sind eine höhere Wahrscheinlichkeit für abnutzungsbedingte Ausfälle³⁰ und eine höhere Fehlerwahrscheinlichkeit, also jener Wahrscheinlichkeit mit der die Betrachtungseinheit von ihrem spezifizierten Verhalten abweicht (vgl. Anhang A). Es muss also stets gelten, dass die Ausfallrate steigt, wenn der Abnutzungsvorrat sinkt bzw. umgekehrt. Diese Abhängigkeiten sind elementar für die simulative Bewertung von Instandhaltungsstrategien.

Ausfall- bzw. Zuverlässigkeitsfunktion und damit auch die übrigen Zuverlässigkeitsgrößen können über bewährte, weil oft auftretende Verteilungsfunktionen beschrieben werden (siehe hierzu u. a. [Bir07], S. 259 ff., [Fis90], S. 24 ff.). Daneben ist die Beschreibung der Zuverlässigkeit auch mittels detaillierten Zustandsinformationen möglich. Dazu werden Messreihen des zustandsbeschreibenden Parameters bzw. Zustandsmaßes aufgenommen und ausgewertet [Har95]. Dieser Ansatz stellt den Aspekt der Systemschädigung und damit die ursprüngliche Motivation für Instandhaltung in den Mittelpunkt. Entsprechend findet dieser Ansatz im Fallbeispiel (vgl. Abschnitt 6.3) Anwendung. Zuvor wird er in Abschnitt 4.7 genauer beschrieben.

4.2 Abnutzungsvorrat

Instandhaltung umfasst den Ersatz oder die Reparatur von Komponenten oder Baugruppen (vor oder nach Ausfall) mit dem Ziel, das System über seine gesamte Lebensdauer betriebsbereit zu halten. Ein möglichst hoher Grad an Betriebsbereitschaft des Systems bedarf eines guten Systemzustands. Mit den einzelnen Instandhaltungsmaßnahmen soll eine Vergrößerung bzw. bestenfalls Wiederherstellung des (Ab-)Nutzungsvorrats und somit eine Zustandsverbesserung erreicht werden. [DIN01]; [DIN03] Dabei differenziert man den Begriff Instandhaltung in Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung (siehe Anhang A).

Die Notwendigkeit für Instandhaltung entspringt somit aus der Abnutzung einer Komponente, einer Baugruppe bzw. eines gesamten Systems. Mit der Abnutzung wird der Prozess der Schädigung einer Einheit durch Beanspruchung beschrieben. Nach ADAM bilden Verschleiß, Ermüdung, Alterung, Korrosion und Verschmutzung die entscheidenden Formen der Abnutzung [Ada89]. Wie aus Abbildung 12 ersichtlich wird, erfolgt eine klare Abgrenzung zwischen Abnutzung und Gewaltnutzung, also jener Form der Beanspruchung, die aufgrund fehlender Bedienung und ungewollter Außenwirkungen durch Überlastung zu spontaner, sprunghafter Schädigung führt. Gewaltnutzung erfolgt in der Regel unvorhersehbar und wird deshalb entgegen der Abnutzung bei der Instandhaltungsstrategieauswahl nicht berücksichtigt.

³⁰ Davon unberührt bleibt die Anzahl zufälliger Ausfälle. Diese treten statistisch gesehen unabhängig voneinander auf und entstehen durch das Zusammenwirken mehrerer voneinander unabhängiger Faktoren.

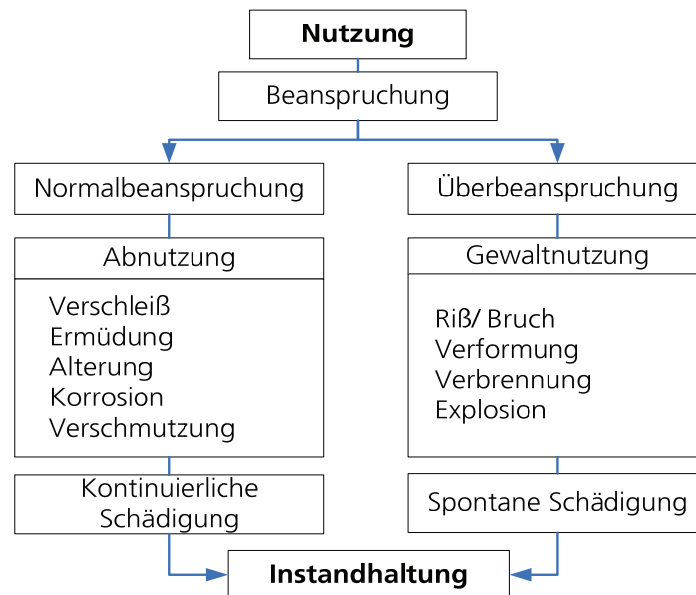


Abbildung 12: Instandhaltung als Funktion von Schädigung (in Anlehnung an [Stu96], S. 42)

Die Abnutzung beschreibt sich durch die Größe des Abnutzungsvorrats [7] (siehe auch Anhang A). Mit dem Abnutzungsvorrat lässt sich der Prozess der Schädigung als Zeitvariable und damit den Übergang der Betrachtungseinheit zwischen den beiden Zuständen intakt (100%) und defekt (0%) erfassen. Ein möglicher Verlauf³¹ des Abnutzungsvorrats ist in Abbildung 13 dargestellt. Erfolgt der Einbau der Anlage in hoher Qualität, so kann zu Beginn der Nutzung von einem Abnutzungsvorrat von 100 Prozent ausgegangen werden. Dieser verringert sich während des laufenden Betriebs durch die mit dem Einsatz der Anlage einhergehende Schädigung. Der dem System zugehörige Abnutzungsvorratsverlauf bestimmt sich durch die Schädigungsrate. Diese beschreibt sich im Wesentlichen durch mechanische, thermische und chemische Beanspruchung (vgl. Abbildung 12). Dabei gilt, dass die mit der Nutzung einhergehende Abnutzung der (Teil-) Systeme immer beanspruchungs- und/ oder zeitabhängig ist. ([Stu96], S. 37 f.) Um die Zustandsverschlechterung zu verlangsamen, werden in der Nutzungsphase Instandhaltungsmaßnahmen am System durchgeführt. Durch die damit erzielten Zustandsverbesserungen wird der Abnutzungsvorrat diskret erhöht. Die Zustandsverbesserung richtet sich nach dem Abnutzungsvorrat, also dem Zustand vor der Instandhaltung sowie nach Art und Umfang der Instandhaltungsmaßnahme. Je nach Häufigkeit und Umfang von Instandhaltungsmaßnahmen (Wartung, Inspektion, Erneuerung) definieren sich der genaue Verlauf des Abnutzungsvorrats im Nutzungszeitraum und damit auch die Häufigkeit einer Unterschreitung der Schadensgrenze. Die Schadensgrenze beschreibt jenen Wert, bei dem ein Schadenseintritt nicht mehr durch präventive Instandhaltungsmaßnahmen zu vermeiden ist. Die Betrachtungseinheit ist dazu zu stark geschädigt. Bei Unterschreitung der Schadensgrenze ist eine Instandsetzung (Entstörung) notwendig. Dabei wird die Anlage mitunter komplett erneuert. Dann kann erneut von einem Abnutzungsvorrat von etwa 100 Prozent ausgegangen werden und der Nutzungszeitraum der Anlage verlängert sich.

³¹ Welche anderen Verläufe ebenfalls für den Abnutzungsvorrat denkbar sind, ist unter anderem in ADAM dargestellt ([Ada89], S. 14).

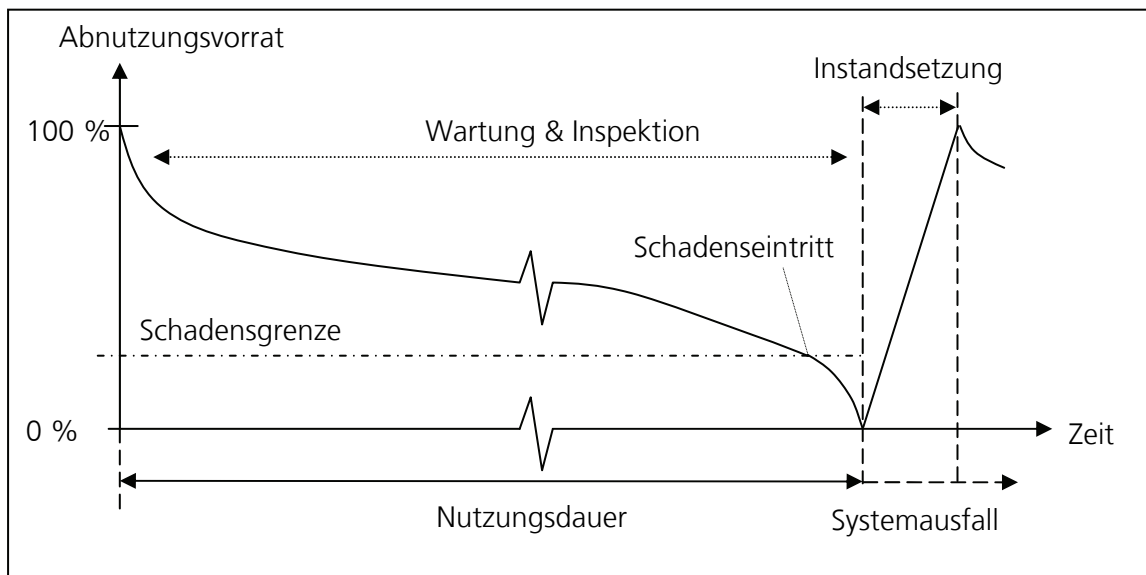


Abbildung 13: Zeitlicher Verlauf des Abnutzungsvorrats (in Anlehnung an [DIN03])

STURM beschreibt den Abnutzungsvorrat als die Differenz zwischen Fertigungs-Istmaß und Aussonderungs-Grenzmaß. Je nach Abnutzungsform ist das relevante Zustandsmaß zu definieren. Ist Verschleiß die entscheidende Größe, so sind die Abmessungen des Bauteils zu überwachen. Der Ermüdungsvorrat definiert sich durch die Wechsellastfestigkeit. Bei Alterung ist die Zeitstandsfestigkeit bestimmend und ein Korrosionsfortschritt lässt sich über die Wanddicke des Bauteils determinieren. ([Stu96], S. 64). Verdeutlichen lässt sich STURMs Ansatz mit Abbildung 14. Das geeignete Zustandsmaß wird durch einen Messwert beschrieben (vgl. [VDI99]). Mit diesem Messwert wird die Zustandsänderung der Betrachtungseinheit überwacht.

Abbildung 14 stellt die zwei grundsätzlichen Verläufe eines Messwertes gegenüber (ohne Instandhaltungsmaßnahmen). Bei einem gleitenden Element kann bspw. der linke Verlauf zutreffen. Mit steigender Betriebsdauer nimmt die Reibung durch schlechtere Schmierung zu. Entsprechend muss zur Gleitbewegung mehr Kraft aufgewendet werden oder die Gleitbewegung dauert länger. Dies kann durch den zugehörigen Messwert erfasst werden. Umgekehrt ist beim Zustandsmaß Wanddicke das Fertigungs-Istmaß ein Maximalwert. Entsprechend erfasst der Messwert die Abnahme der Wanddicke durch Korrosion etc. und fällt mit zunehmender Einsatzdauer der Betrachtungseinheit (vgl. Abbildung 14, rechter Verlauf).

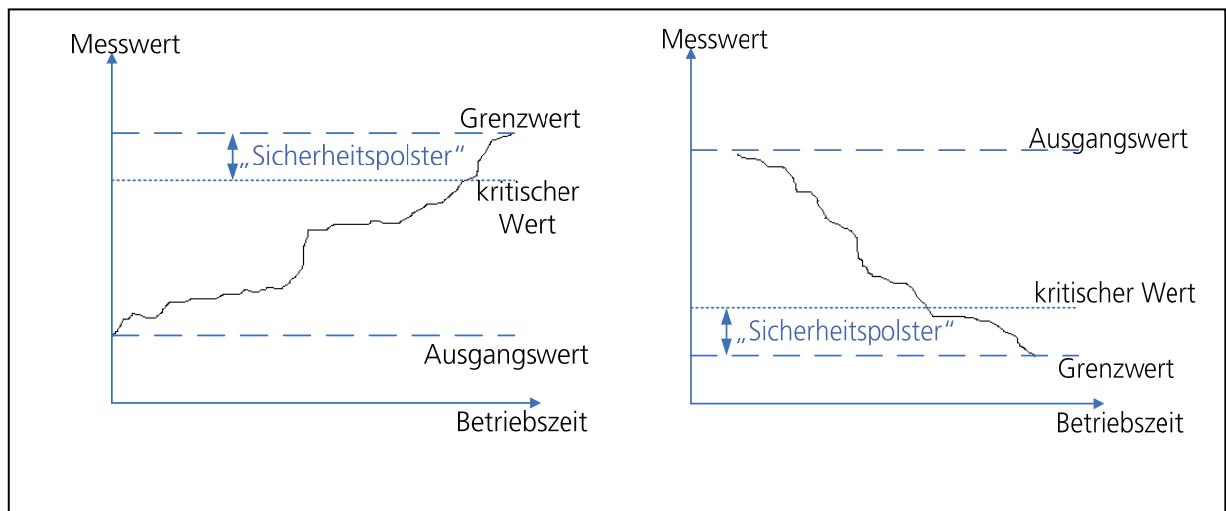


Abbildung 14: Messwertverläufe zur Zustandsbeschreibung

Bei präventiven Instandhaltungsmaßnahmen definiert der kritische Wert den spätesten Zeitpunkt für Instandhaltungsmaßnahmen. Das Sicherheitspolster, das den Abstand zwischen definiertem kritischem Wert und Grenzwert (= Messwert, ab dem die Einheit nicht mehr intakt ist) beschreibt, sollte dabei umso größer gewählt werden, je höher die Sicherheitsanforderungen an die Betrachtungseinheit sind oder je ungenauer die Zustandsbeschreibung durch den Messwert erfolgt. Dabei muss bei einer Strategiebewertung auch bedacht werden, ob und wenn ja wie sich bis zum Erreichen des Grenzwerts trotz Funktionstüchtigkeit die Ausbringungsqualität bzw. Leistungsfähigkeit verändert oder nicht.

Da wie beschrieben der Bedarf an Instandhaltung und damit auch die Notwendigkeit für eine Instandhaltungsstrategie aus der Abnutzung einer Betrachtungseinheit begründet ist, bildet die Abnutzung und ihr Verlauf, beschrieben durch den Abnutzungsvorrat, das Kernelement der Strategiemodellierung (vgl. Abschnitt 4.7). Entsprechend umfangreich wurden die geltenden Zusammenhänge an dieser Stelle beschrieben.

Aus der Höhe der Abnutzungsvorräte zu analysierender Systeme lassen sich jedoch nur indirekt Rückschlüsse auf die Erfolgswirksamkeit einer Instandhaltungsstrategie schließen. Hierzu eignet sich die im nachfolgenden Abschnitt beschriebene Größe der Instandhaltungskosten.

4.3 Instandhaltungskosten

In der Regel bilden die Instandhaltungskosten das Entscheidungskriterium bei der Wahl einer Instandhaltungsstrategie (vgl. [Stu96], S. 89). In dieser Kennzahl werden die Effekte der Instandhaltung monetarisiert. Sie ermöglicht einfach nachvollziehbare Alternativenvergleiche.

Die Instandhaltungskosten werden grundlegend in direkte und indirekte Instandhaltungskosten unterteilt (vgl. Abbildung 9) und bezeichnen zusammenfassend alle Kosten, die durch

Instandhaltungsmaßnahmen und damit mit der Einflussnahme auf den AV verursacht werden. ([Eng03], S. 21 ff.)

Die direkten Instandhaltungskosten umfassen jene Kosten, die direkt mit der Durchführung einer Instandhaltungsmaßnahme verbunden sind und bestimmen sich durch:

- Personalkosten
 - Instandhaltungsdauern (inkl. Vorbereitungszeit),
 - Personalbedarf und
 - Personalstundensatz (= Lohnkosten inkl. Lohnnebenkosten)
- Materialkosten

Sie werden wesentlich durch die Instandhaltbarkeit der Anlagenkomponenten determiniert – je besser, desto niedriger sind die Zeit-, Personal- und Materialaufwendungen. Somit stellen die direkten Instandhaltungskosten den mit Geld bewerteten Einsatz von Mitteln zur Bewahrung und Wiederherstellung des Soll-Zustands einer Anlage dar.

Dem gegenüber umfassen die indirekten Instandhaltungskosten die in Geld bewerteten Einbußen, die durch die Instandhaltung und der damit verbundenen Nichtverfügbarkeit des Systems verursacht werden. ([Ada89], S. 102 ff.) Die wichtigsten Kostenfaktoren hierbei sind:

- Stillsetzungs- und Stillstandskosten,
- Opportunitätskosten, d. h. Kosten durch entgangene Gewinne durch Betriebs- bzw. Produktionsausfall bzw. Qualitätsminderungen (z. B. bewertete Verspätungsminuten) und
- bewertete Wertminderung.

Der Anteil indirekter Kosten fällt umso niedriger aus, je weniger Instandhaltungsmaßnahmen notwendig sind. Zusätzlich gilt, dass sie geringer ausfallen, wenn weniger Instandhaltungsmaßnahmen während des normalen Betriebs erfolgen, also je mehr die Instandhaltung in Betriebspausen verlagert wird. Die indirekten Kosten stehen somit im direkten Zusammenhang mit der Systemverfügbarkeit. Die Systemverfügbarkeit A [8] ist definiert als die Fähigkeit einer Einheit zu einem gegebenen Zeitpunkt oder während eines gegebenen Zeitintervalls funktionsfähig zu sein [DIN01].

$$A = \frac{\text{Gesamtbetriebsdauer} - \text{Gesamtausfalldauer}}{\text{Gesamtbetriebsdauer}} \quad [8]$$

Die Nichtverfügbarkeit eines Systems wird demzufolge mittels der indirekten Kosten quantifizierbar und fließt somit in die Strategiebewertung ein. Im Schienenverkehr werden diese Posten in den sogenannten Betriebserschwerungskosten (BEK) zusammengefasst.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die zur Einflussnahme auf den Systemzustand (AV) erfolgenden Instandhaltungsmaßnahmen die Determinante für die Höhe der Erfolgsgröße Instandhaltungskosten sind. Diese wiederum bestimmen sich in ihrem Umfang und Zeitpunkt

durch die Wahl der Instandhaltungsstrategie. Der Instandhaltungsstrategiebegriff sowie grundlegende Strategien der Instandhaltung sind im folgenden Abschnitt 4.4 erläutert.

4.4 Instandhaltungsstrategien

Mit der Instandhaltungsstrategie wird detailliert die Art und Weise der Instandhaltung und damit der Realisierung notwendiger Zustandsverbesserungen des Systems festgelegt. Die Kenntnis vom Systemverhalten und ihrer Abnutzung ist somit elementar für die Ausgestaltung der Strategie. Instandhaltungsstrategien beinhalten die Bestimmung, Zuordnung und Ausführung notwendiger Instandhaltungsmaßnahmen (Reparatur, Ersatz, Inspektion) über den gesamten Einsatzzeitraum der Anlage. Die Festlegung der Instandhaltungsstrategie nimmt einen großen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Anlagen und die Kostenwirksamkeit der Instandhaltungsmaßnahmen ([Stu96], S. 108) und damit auf die Wirtschaftlichkeit des gesamten Anlagenbetriebs. (vgl. Abbildung 15)

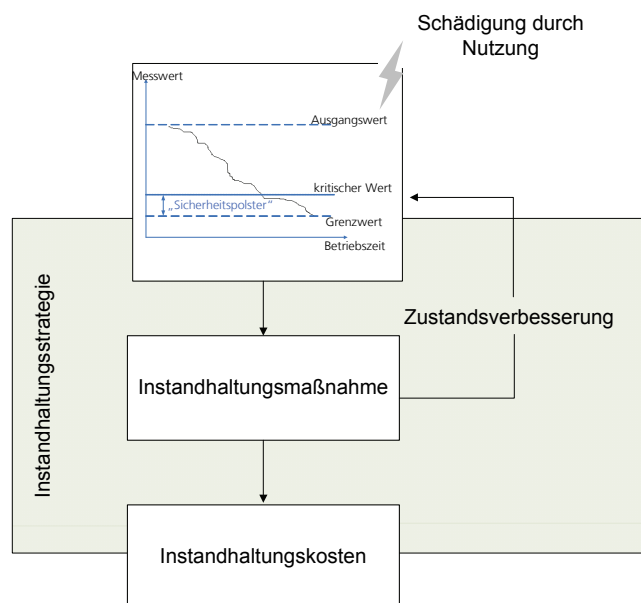


Abbildung 15: Instandhaltungsstrategie – Zusammenhang zwischen Zustand, Maßnahmen und Kosten

Prinzipiell werden an die Definition der Instandhaltungsstrategie nachfolgend genannte vier Forderungen gestellt. Dabei sind diese im Besonderen für das Umfeld der kostenintensiven und in hohem Maße betriebsrelevanten Bahnsicherungstechnik zutreffend.

1. Minimale Instandhaltungskosten und damit ein niedriger Beitrag zu den Lebenszykluskosten,
2. Maximierung der Systemlebensdauer,
3. Sicherung eines hohen Verfügbarkeits- und Sicherheitslevels und
4. Minimierung der Nichtverfügbarkeitszeiten im Normalbetrieb ([Har95], S. 52)

Kernaufgaben bei der Definition von Instandhaltungsstrategien sind

1. die sinnvolle Aufstellung eines Instandhaltungsprogramms, d. h. die Art und Häufigkeit von Instandhaltungsmaßnahmen, sowohl über die gesamte Lebensdauer der Systemkomponenten als auch über die der Anlage und
2. die Aufstellung einer geeigneten Organisationsstruktur, d. h. die Planung von Personal, Ersatzteilen und Werkzeugen, um die Instandhaltungsaufgaben mit den vorhandenen Ressourcen wirtschaftlich effizient wahrnehmen zu können ([Kel97], S. 41f.), sowie eines kontinuierlichen Controllings von Instandhaltungskosten und -leistungen ([Stu96], S.141 ff.).

Die Bestimmung eines geeigneten Instandhaltungsprogramms (1.) ist im Gegensatz zur Aufstellung der Organisationsstruktur (2.) eine Schnittstellenaufgabe, für die neben betriebswirtschaftlichem Know-how detaillierte Anlagenkenntnisse notwendig sind. Mit der Programm-entscheidung wird die Kernaufgabe der Instandhaltung adressiert. Sie steht deshalb im Zentrum dieser Arbeit. Mit dem hier aufgestellten Bewertungsverfahren gelingt damit die Definition von Instandhaltungsstrategien i. e. S., also die Aufstellung des Instandhaltungsprogramms (1.) ohne die Berücksichtigung organisatorischer Fragestellungen (2.).

Grundsätzlich besteht bei der Auslegung einer geeigneten Instandhaltungsstrategie ein hohes Maß an Gestaltungsfreiheit (vgl. [Ada89], S. 54 ff.). Unabhängig davon werden vier grundlegende Instandhaltungsstrategien unterschieden. Zum einen unterscheidet man in die zwei präventiven Strategien, bei denen die Maßnahmen je nach Strategie entweder zeitabhängig oder zustandsabhängig ausgelöst werden. Daneben existiert die korrektive Instandhaltungsstrategie. Hier ist der Ausfall das auslösende Ereignis. Die zufällige Instandhaltung bildet die vierte Grundstrategie. Hier erfolgen die Instandhaltungsmaßnahmen kurzfristig ohne erkennbares Schema. Bei hochwertigen Anlagegütern spielt sie keine Rolle und soll deshalb in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden. Die Instandhaltungsstrategien unterscheiden sich somit in der Art und Weise wie Instandhaltungsmaßnahmen ausgelöst werden sowie in deren Umfang (Wartung, Inspektion, Instandsetzung) (siehe Abbildung 16). Die perfektive Instandhaltung sei hier nur der Vollständigkeit genannt. Sie nimmt mit ihrer Aufgabe der Systemverbesserung eine, bezogen auf das primäre Instandhaltungsziel der Zustandsverbesserung, untergeordnete Rolle ein. Mit den Maßnahmen der perfektiven Instandhaltung wird in erster Linie das Ziel einer Effizienzsteigerung in oder durch die Betrachtungseinheit verfolgt, weniger das im Bahnbetrieb vordergründige Ziele der Sicherung der Systemverfügbarkeit.

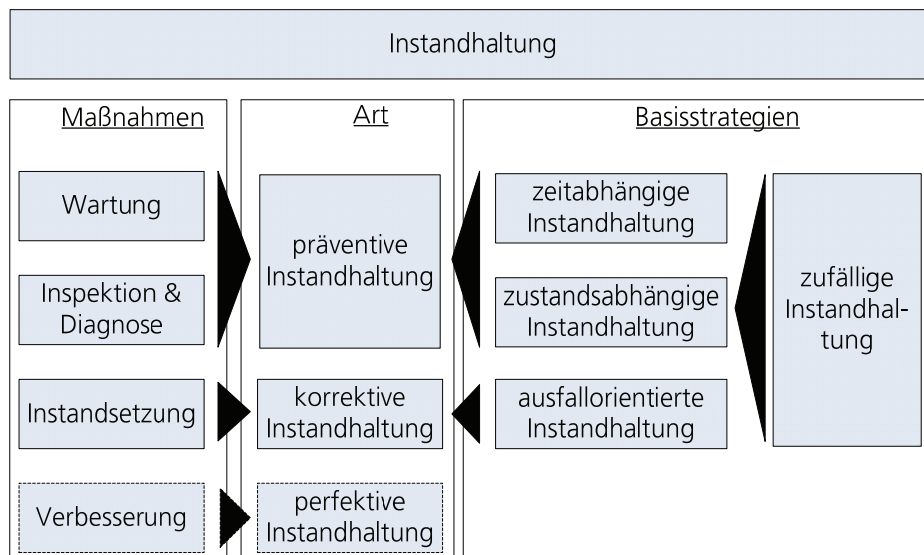


Abbildung 16: Strukturierung Instandhaltung (vgl. [DIN03])

Unabhängig von der Strategieauslegung gelten die in Abbildung 17 dargestellten Zusammenhänge. Die Abbildung macht deutlich, dass die Instandhaltungskosten für präventive Instandhaltung mit der Zunahme an präventiven Instandhaltungsmaßnahmen steigen. Im Normalfall treten bei präventiven Instandhaltungsmaßnahmen keine Ausfallkosten (Folgekosten) ein, da die Maßnahmen in den Betriebspausen durchgeführt werden. Dies ändert sich jedoch, wenn so viele Maßnahmen geplant werden, dass zu deren Durchführung die Betriebspausen nicht mehr ausreichen. Dann treten präventive Ausfallkosten (Folgekosten) auf. Vorteilhaft wirkt sich eine hohe Anzahl präventiver Maßnahmen (falls diese korrekt ausgeführt werden) auf die Anzahl an Ausfällen aus. Deren Anzahl und damit auch die Kosten für korrektive Instandhaltungsmaßnahmen und die mit den Ausfällen einhergehenden Ausfallkosten (Folgekosten) sinken.

Bei der Strategiefindung gilt es also das rechte Maß zwischen präventiven und korrektiven Instandhaltungsmaßnahmen zu finden, um damit möglichst niedrige Instandhaltungskosten über den gesamten Nutzungszeitraum der Anlage zu verursachen. Dabei sind die Anforderungen bezüglich Sicherheit, Anlagenverfügbarkeit, Betriebsqualität und Lebensdauer der Anlage zu berücksichtigen. Wenn möglich sind diese Aspekte in die Kennzahl Instandhaltungskosten zu integrieren (vgl. Abschnitt 4.3). Dadurch ist eine aussagekräftige Gegenüberstellung denkbarer Instandhaltungsstrategien anhand der Erfolgsgröße Instandhaltungskosten möglich. Dieser Aspekt wird in der Instandhaltungsstrategiebewertungssystematik berücksichtigt (vgl. Abschnitt 4.7).

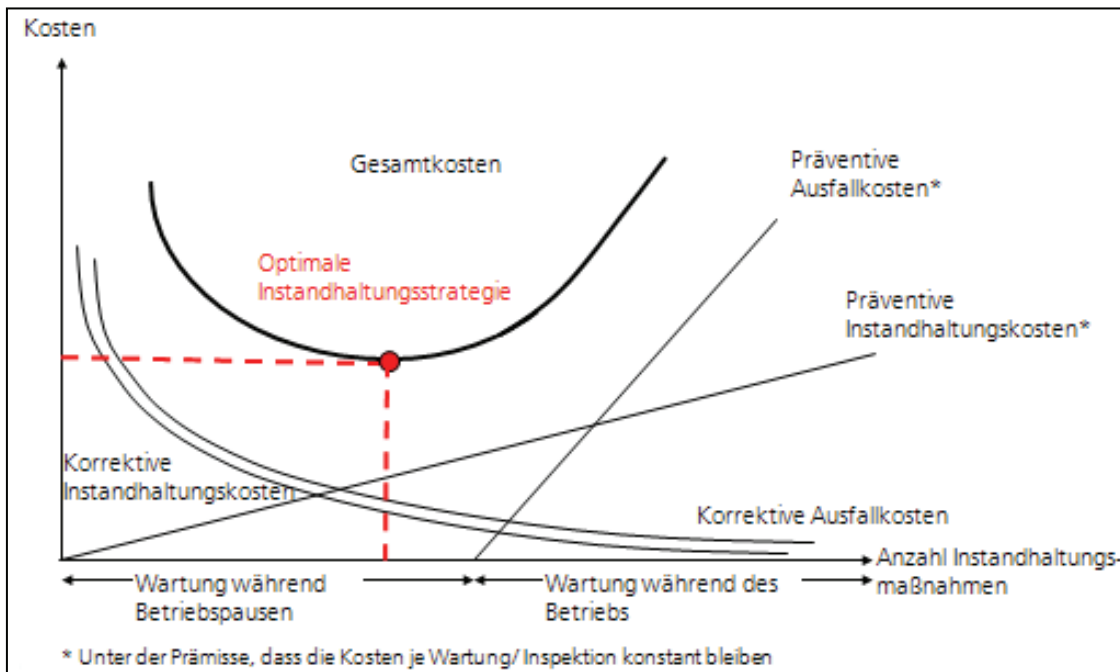


Abbildung 17: Zusammenhang zwischen präventiven und korrektiven Instandhaltungsmaßnahmen (in Anlehnung an [Kel97], S. 98)

Vorab werden zunächst die im Bahnumfeld relevanten Basisinstandhaltungsstrategien eingehender erläutert.

4.4.1 Zeitabhängige Instandhaltung

Die Strategie der zeitabhängigen Instandhaltung ist eine der beiden präventiven Instandhaltungsgrundstrategien (vgl. Abbildung 16). Bei ihr erfolgen die Instandhaltungsmaßnahmen nach einem festgelegten Zeitplan oder einer festgelegten Zahl von Nutzungseinheiten. Für die Definition präventiver Instandhaltungsmaßnahmen sind grundlegend folgende zwei Fragestellungen zu beantworten:

1. Welche Instandhaltungsmaßnahmen sind auszuführen?
2. Wann sind die Instandhaltungsmaßnahmen auszuführen?

Zur Beantwortung von 1. ist die Kenntnis von Zustandsveränderungen und damit des Verlaufs des Abnutzungsvorrats, wie er in Abbildung 13 schematisch dargestellt ist, elementar. Dies gilt für die zeitabhängige wie die zustandsabhängige präventive Instandhaltungsstrategie gleichermaßen, wobei für erstere eine ungefähre Kenntnis ausreicht. Die zeitabhängige unterscheidet sich in erster Linie von der zustandsabhängigen Instandhaltungsgrundstrategie durch ihre Antwort auf Frage 2. Aufbauend auf den Kenntnissen zu den für die Betrachtungseinheit zutreffenden Beanspruchungsarten (vgl. Abbildung 12) werden bei der zeitabhängigen In-

standhaltung fixe Fristen (oder auch Ausbringungsmengen³²) festgelegt, nach denen definierte Instandhaltungsmaßnahmen auszuführen sind. Da diese Instandhaltung rein fristorientiert erfolgt, werden mitunter Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt, die zu diesem Zeitpunkt bspw. aufgrund einer sich verlangsamten Zustandsverschlechterung noch nicht notwendig sind. Zu welchen Effizienzverlusten dies führen kann, wird in [BJL07] am Beispiel der Eisenbahnweiche deutlich. ZWANENBURG verdeutlicht den Effizienzverlust am Beispiel der Erneuerung, welcher in Anlehnung an den Verlauf des AV (vgl. Abbildung 13) in Abbildung 18 veranschaulicht wird. Durch verfrühte Instandsetzungsmaßnahmen, d. h. vor Erreichen der Mindestqualität (Q_{\min}) bzw. eines definierten Grenzwertes, wird die vom System mögliche Lebensdauer nicht voll ausgeschöpft. Die nicht genutzte Restqualität (Restabnutzungsvorrat) führt zu Produktivitätsverlusten in der Instandhaltung.

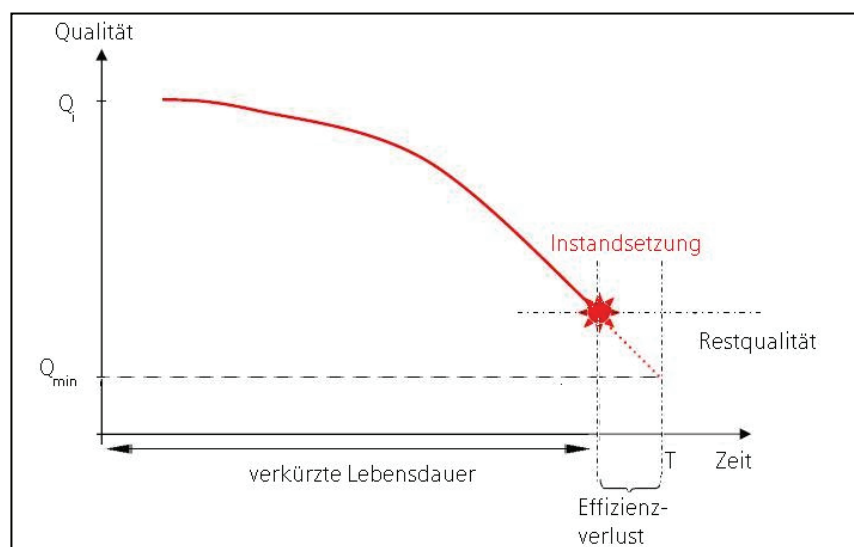


Abbildung 18: Produktivitätsverlust durch zeitabhängige Instandhaltung (in Anlehnung an [Zwa07])

4.4.2 Zustandsorientierte Instandhaltung

Das Ziel der zustandsorientierten Instandhaltung ist es, die Vorteile einer vorbeugenden Instandhaltung (höhere Systemverfügbarkeit, bessere Planbarkeit) ohne die Nachteile einer Zeitstrategie (Effizienzverlust) durch bessere Ausnutzung der Systemlebensdauer zu nutzen (vgl. Abbildung 18). Sie gilt aus diesem Grund im Vergleich zu einer zeitabhängigen Instandhaltung als effizienter [Kel97] ([Nea95], S 52 ff.). Die Ziele der zustandsorientierten Instandhaltung können somit wie folgt zusammengefasst werden:

1. Verhinderung bzw. Minimierung unerwarteter Ausfälle (d. h. Ausfälle sind für die Betrachtungseinheit aus Sicherheitsgründen und/ oder finanzieller Sicht weitgehend zu vermeiden),
2. Planung der Maßnahmen in den Betriebspausen erleichtern und

³² Vgl. z. B. die Wartung der ICE-Züge, die nach einer definierten Anzahl gefahrener Kilometer zu erfolgen hat.

3. Instandhaltungseffizienz steigern/ Instandhaltungskosten senken durch Zustandswissen.

Die Ziele 1 und 2 sind sowohl auf die zustandsorientierte als auch die zeitabhängige Instandhaltung zutreffend. Mit dem dritten Ziel, in dem die besondere Relevanz des Zustandswissens aufgegriffen wird, erfolgt die Abgrenzung zur zeitabhängigen Instandhaltung.

Grundlage dieser Strategie bildet die Erkenntnis, dass eine Verschlechterung des Systemzustands, gemessen in Form der Abnutzung, Ausgangspunkt für Instandhaltungsmaßnahmen sein sollte. Somit werden die einzelnen Instandhaltungsmaßnahmen in Abhängigkeit vom eigentlichen Zustand und/ oder Output der Betrachtungseinheit definiert. Dadurch ergibt sich für die Einführung einer zustandsabhängigen Instandhaltung die absolute Notwendigkeit für das Verständnis und die Erfassung des Schädigungsverhaltens der Einheit und ihrer schädigenden Parameter.

Die Beantwortung der auch hier zutreffenden Frage „Wann sind die Instandhaltungsmaßnahmen auszuführen“ (vgl. Abschnitt 4.4.1) ist bei dieser Instandhaltungsstrategie demzufolge nicht pauschal mit einem Zeitpunkt oder Zeitraum möglich. Vielmehr richtet sich die Notwendigkeit für Instandhaltungsmaßnahmen – entsprechend der Strategiebezeichnung – nach dem Zustand der Betrachtungseinheit. Da dieser über den Nutzungszeitraum der Betrachtungseinheit variieren kann, verändert sich auch die Häufigkeit notwendiger präventiver Maßnahmen. In keiner der Grundstrategien spielt somit die Größe Abnutzungsvorrat eine so wichtige Rolle wie in dieser. Wie der Abnutzungsvorrat in der Praxis ermittelt wird, soll deshalb an dieser Stelle erläutert werden. Daneben wird die Herangehensweise bei der Umsetzung dieser Instandhaltungsstrategie kurz erläutert. ([Har95], S. 133) ([Brü99], S. 44) ([Stu96], S. 101 ff.) Das Verständnis beider Aspekte ist für die Modellierung der Instandhaltungsstrategien (siehe Abschnitte 4.7 und 6.3) notwendig.

Die folgenden fünf Arbeitsschritte fassen zusammen, wie bei der Umsetzung einer zustandsorientierten Instandhaltung und damit eines Zustandsprädiktionsmodells vorgegangen wird (vgl. [VDI99]). Dabei können die Arbeitsschritte je nach notwendiger Analysetiefe für komplexe Anlagen, Einzelausrüstungen oder Baugruppen ausgeführt werden ([Stu96], S. 102).

1. Identifikation der n kritischen Systemeinheiten, d. h. jener Einheiten deren Funktionsfähigkeit eine hohe Relevanz für Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Betriebes haben und mit denen sich der Systemzustand beschreiben lässt,
2. Definition der Abnutzungsursachen und -auswirkungen,
3. Identifikation geeigneter Messgrößen und deren Grenzwerte,
4. Festlegung der passenden und zugleich kostengünstigen Messtechnik und
5. Auswertung von Testläufen (z. B. Belastungstests, Zuverlässigkeitstests) und Bestimmung von Instandhaltungsmaßnahmen in Abhängigkeit vom Zustand der kritischen Einheiten.

Da diese Schrittfolge mit zum Teil erheblichen Arbeitsaufwand verbunden ist, sind zunächst jene kritischen Systemeinheiten zu identifizieren, für die aufgrund ihrer Eigenschaften keine zustandsabhängige Instandhaltung möglich ist. Dies gilt, wenn zum einen der Zustand der

Einheit nicht messbar ist und/ oder das Fehlverhalten nicht durch kontinuierliche Schädigung, sondern durch eine plötzliche Zustandsänderung beschrieben wird.³³

Mögliche Abnutzungsursachen sind in Abbildung 12 dargestellt. Die Auswirkungen richten sich jeweils nach dem System selbst sowie seinen betrieblichen Aufgaben.

Aus den Schritten drei und vier wird deutlich, dass für die Umsetzung einer zustandsorientierten Instandhaltung die Messung des Systemzustands mittels geeigneter Messtechnik unabdingbar ist. Umgekehrt bedeutet dies, dass eine zustandsorientierte Instandhaltung nur für solche System(-einheiten) umsetzbar ist, deren Abnutzungsverhalten in der Nutzungsphase bestimmt werden kann³⁴. Dies kann entweder mittels einer zeitkontinuierlichen Zustandserfassung, dem sogenannten ONLINE-Monitoring, oder einer zeitdiskreten Zustandserfassung, dem sogenannten OFFLINE-Monitoring, erfolgen. Beim OFFLINE-Monitoring, mitunter auch als Inspektion bezeichnet, erfolgt die Zustandserfassung entweder nach einem fixen Zeitintervall oder die Zeitpunkte werden sequentiell festgelegt. Das bedeutet, dass nach jeder Inspektion der Zeitpunkt der nächsten bestimmt wird. In der Regel werden dabei Messgeräte verwendet, die die zuvor definierten Zustandsparameter abfragen. ONLINE-Monitoring beruht auf dem Einsatz von permanent in die Betrachtungseinheit eingebauter Messtechnik und einer kontinuierlichen Datenaufzeichnung. Damit wird eine Zustandsabfrage zu jedwedem Zeitpunkt ermöglicht. Der erkennbare Vorteil des ONLINE-Monitoring, dass auf mitunter kostenintensive Inspektionen verzichtet werden kann, kommt jedoch erst dann zum Tragen, wenn die notwendige Messtechnik nicht zu teuer ist. Als Konsequenz ist festzuhalten, dass das ONLINE-Monitoring nur dann angewendet werden sollte, wenn die Messtechnik kostengünstiger ist als die Durchführung regelmäßiger Inspektionen. Bei beiden Monitoring-Verfahren werden die ermittelten Daten im Anschluss entweder direkt vor Ort oder nachträglich durch stationäres Wartungspersonal hinsichtlich der hinterlegten Grenzwerte ausgewertet. Das Ergebnis liefert eine Aussage zum Systemzustand und lässt damit Rückschlüsse auf notwendige Instandhaltungsmaßnahmen zu. Unabhängig davon, welche Art der Zustandsüberwachung gewählt wird, bei beiden sind die geeignete(n) Methode(n) und Messgrößen der Zustandserfassung zu identifizieren, also jener Methode(n) und Messgrößen mit der/ denen sich die Abnutzung der Betrachtungseinheit am besten beschreiben bzw. erfassen lässt. Nachfolgende Abbildung 19 bietet einen kurzen Einblick in die grundlegenden Methoden, mit denen es möglich ist, die Abnutzung und damit den Zustand einer Betrachtungseinheit zu erfassen. Die Auswahl der geeigneten Methode(n) und der dazugehörigen Technik richtet sich nach den Eigenschaften der Betrachtungseinheit in Form der im 2. Schritt ermittelten Abnutzungsursachen und -auswirkungen sowie nach den Möglichkeiten und Kosten der verfügbaren Messtechnik. ([Kel97], S. 117 ff.), ([Nea95], S. 55 ff.), ([WDD94], S. 68 ff.), ([Wil02], S. 291ff.) Einen

³³ Zur umfassenden Einteilung von Fehlern siehe ([Har95], S. 22 ff.)

³⁴ Für elektronische Bauteile ist der Einsatz dieser Instandhaltungsstrategie bisher nur bedingt möglich, da man bei elektrischen, hydraulischen und elektronischen Systemen bisher lediglich von den beiden Zustandsmerkmalen „im Betrieb“ und „außer Betrieb“ ausgeht und damit keine mehrstufige Differenzierung des Zustands vornimmt ([Ada89], S. 80). In der Zuverlässigkeitstheorie werden sie i. d. R. mittels einer Exponentialverteilung beschrieben. Diese stellt einen Spezialfall der Weibullverteilung dar, bei dem der Formfaktor 1 und damit die Ausfallrate konstant ist. Jedoch ermöglichen es Weiterentwicklungen in der Überwachungs- und Diagnosetechnik zunehmend, immer genauere Prognosen des Ausfallzeitpunktes zu machen und damit eine bessere Planung mit geringeren Stillstandszeiten realisieren zu können.

Überblick über geeignete Messtechniken bietet [Har95]. In der VDI-Richtlinie 2888 [VDI99] sind bewährte zustandsbeschreibende Messgrößen zusammengetragen.

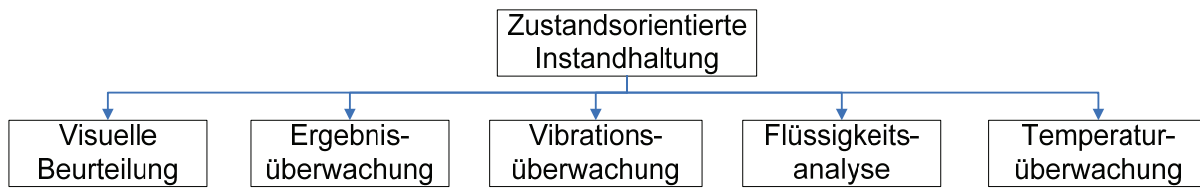


Abbildung 19: Methoden der Zustandserfassung

4.4.3 Ausfallorientierte Instandhaltung

Entgegen den zuvor beschriebenen präventiven Instandhaltungsstrategien werden bei der ausfallorientierten Instandhaltung die Instandhaltungsmaßnahmen erst nach der Fehlererkennung ausgeführt. Dann jeweils mit dem Ziel die Betrachtungseinheit in einen Zustand zu bringen, in dem es seine geforderte Funktion erfüllen kann [DIN01]. Prinzipiell ist auch für diese Strategie der Abnutzungsvorrat die Kennzahl, die bestimmend für die Instandhaltungsmaßnahmen und –kosten ist. In der praktischen Anwendung dieser Instandhaltungsstrategie spielt deren Kenntnis jedoch eine untergeordnete Rolle, da der Kern dieser Strategie, auch „Feuerwehrstrategie“ genannt, im Reagieren auf Ausfallereignisse und nicht in deren Verhindern durch Prävention liegt. Das bedeutet, dass Instandhaltungsmaßnahmen erst dann ergriffen werden, wenn das System ausgefallen ist. Diese Form der Instandhaltung, die ausschließlich auf das Instrument der Instandsetzung zurückgreift, ist nur bei Betrachtungseinheiten möglich, deren Einfluss auf den sicheren, verfügbaren Betriebsablauf gering ist und deren Instandsetzungskosten im Vergleich zu präventiven Maßnahmen gering ausfallen. Erfolgt ein Austausch der Betrachtungseinheit aus Sicherheits- oder Verfügbarkeitsaspekten vorzeitig, also obwohl die Betrachtungseinheit noch funktionsfähig ist, so wird dies als eine präventive Maßnahme und nicht als Instandsetzung verstanden [DIN03].

Unabhängig von den zustandsbedingten Ereignissen treten sogenannte Grund- bzw. Spontanausfälle auf. Diese sind in erster Linie durch zufällige externe wie interne Ereignisse bestimmt. Sie ziehen unabhängig von der Instandhaltungsstrategie Instandsetzungen nach sich. Mit der Wahl der Instandhaltungsstrategie kann bedingt Einfluss auf die Auswirkungen solcher zufälligen Ereignisse genommen werden.

Zusammenfassend sind die Charakteristika sowie Vor- und Nachteile und typischen Einsatzfelder der hier detaillierter beschriebenen drei Basisstrategien sowie die zufällige Instandhaltung (vierte Basisstrategie) (vgl. Abbildung 16) in Tabelle 1 gegenübergestellt.

| Strategie | Charakteristika | Vorteile | Nachteile | Einsatzfelder |
|---------------------------|---|--|--|---|
| zeitabhängige Wartung | präventive Instandhaltung wird nach fixen Zeitintervallen bzw. nach fixer Ausbringungsmenge, Betriebsdauer, etc. ausgeführt | <ul style="list-style-type: none"> - gute Planbarkeit - kaum unerwartete Stillstandszeiten - niedrige Ausfallkosten | <ul style="list-style-type: none"> - erhöhte Anlagenzuverlässigkeit nur, wenn Ausfälle durch Schädigung begründet sind und wenn die Lebensdauer der zu wartenden Komponente geringer als die des zugehörigen (Sub-)Systems ist - Instandhaltungseffizienz hängt von der Voraussagbarkeit des Ausfallzeitpunktes ab; je genauer, desto effizienter - Instandhaltung erfolgt weitgehend unabhängig vom Systemzustand - erhöhter dispositiver Aufwand für Personal und Material | <ul style="list-style-type: none"> - bei Wartung vieler gleicher Komponenten - Wartung vieler unterschiedlicher Komponenten in einem frei verfügbaren Zeitfenster/ Produktions-/ Betriebspause - Wartung sicherheits- und/ oder betriebskritischer Komponenten bei denen Online-Diagnose nicht möglich ist und kaum Betriebspausen der Anlage gegeben sind |
| zustandsabhängige Wartung | <ul style="list-style-type: none"> - präventive Instandhaltungsmaßnahmen in Abhängigkeit der Schädigung (über Zustandsmessung) bestimmt - Strategieerfolg abhängig von der Genauigkeit der Zustandserfassung und damit des Ausfallzeitpunktes | <ul style="list-style-type: none"> - weitgehende Ausnutzung des Abnutzungsvorrats - hohe Anlagenzuverlässigkeit - niedrigere Instandhaltungskosten durch Verringerung der Anzahl von Inspektionen - effizienteres Ersatzteil- und Personalmanagement möglich | <ul style="list-style-type: none"> - Zustand muss messbar/ beschreibbar sein - Zustandsüberwachung inkl. Messgeräten notwendig - z. T. hohes Datenaufkommen - in vielen Einsatzfeldern unzureichende Erfahrung/ Daten bzw. Kenntnisse zum Systemverhalten; bisher vor allem Verwendung von MTBF-Werten | <ul style="list-style-type: none"> - bei Wartung von Komponenten, die eine geringe Ausfallvorhersage zulassen, die zufällig ausfallen bzw. zu denen keine Ausfallstatistiken vorhanden sind - Einheiten müssen Abnutzung aufweisen und dieser muss bestimmbar sein - regelmäßige Inspektionen bzw. der Einsatz von Messequipment muss wirtschaftlicher sein als der frühzeitige Austausch der Einheit bzw. mögliche Ausfallfolgekosten - Systemausfälle beeinflussen die interne und externe Sicherheit |

| Strategie | Charakteristika | Vorteile | Nachteile | Einsatzfelder |
|--|---|---|--|--|
| ausfallorientierte Instandhaltung („Feuerwehrstrategie“) | <ul style="list-style-type: none"> - keine Maßnahmen zur Fehlervermeidung - nur korrektive Instandhaltung | <ul style="list-style-type: none"> - keine Wartungskosten - kaum dispositiver Planungsaufwand | <ul style="list-style-type: none"> - Instandhaltungsmaßnahmen nicht planbar - eventuell Störungen an anderen/ benachbarten Systemen | <ul style="list-style-type: none"> - wenn Ausfallereignisse keine bzw. kaum Konsequenzen auf Betrieb, Sicherheit und Qualität haben - wenn Ausfallereignis am kostengünstigsten ist und Betriebsablauf ausreichend Zeit zur Fehlerbehebung ermöglicht (ohne Auswirkungen auf den Betrieb) - wenn keine Informationen über Schädigungsverhalten vorliegen - für Anlagen mit schneller wirtschaftlicher Entwertung |
| zufällige Instandhaltung | <ul style="list-style-type: none"> - Instandhaltungsmaßnahme erfolgt mit Instandhaltung anderer Komponenten | <ul style="list-style-type: none"> - bindet kaum Planungsressourcen | <ul style="list-style-type: none"> - erhöhtes Risiko eines Ausfalls - Zuverlässigkeitsausagen schwer zu treffen - kann zu unerwarteter Verlängerung des Instandhaltungseinsatzes kommen | <ul style="list-style-type: none"> - geeignet für Anlagen mit geringer Bedeutung im Betriebsablauf - bei schneller und einfacher Instandhaltung |

Tabelle 1: Übersicht Grundstrategien der Instandhaltung

Tabelle 1 bietet dem Verantwortlichen eine Orientierung bei der Definition der für die Investitionsalternativen geeigneten, zu bewertenden Instandhaltungsstrategien. So ist beispielsweise neben dem lebenslangen Fortschreiben derselben Basisstrategie ein Wechsel von einer zustandsorientierten in eine zeitabhängige Instandhaltung innerhalb des Lebenszyklus möglich. Eine Veränderung bzw. Anpassung der Instandhaltungsstrategie ist beispielsweise bei Anlagen mit langen Lebensdauern denkbar (vgl. [Los96]). Solche Strategievarianten/ -kombinationen sind hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit zu prüfen.

Aufgrund der Komplexität der Wechselwirkungen sind sowohl Basis- als auch Kombinationsstrategien nur unter Einsatz von informationstechnischen Auswertungsmöglichkeiten (Software) zu bewerten. Dies hat Auswirkungen auf das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren (vgl. Abschnitte 4.7 und 5.3.2)

Aufbauend auf dem geschaffenen Verständnis für die Unterschiede sowie Vor- und Nachteile der Basisinstandhaltungsstrategien wird im nun folgenden Abschnitt das prinzipielle Vorgehen

bei einer Strategieauswahl beschrieben. Mit einem solchen Auswahlverfahren gelingt eine systematische Identifikation der unter gegebenen betrieblich-technologischen Randbedingungen für das Untersuchungsobjekt in Frage kommenden Instandhaltungsstrategien.

4.5 Strategieauswahl

Bevor eine Modellierung und Bewertung von Instandhaltungsstrategien mit dem Ziel der Identifikation der optimalen Instandhaltungsstrategie (vgl. Abbildung 17) erfolgen kann, sind zunächst für die Betrachtungseinheit geeignete Instandhaltungsstrategien zu identifizieren. Welche Strategien für eine Bewertung in Frage kommen, richtet sich nach der Betrachtungseinheit selbst (Aufbau, Material etc.) und ihren Einsatzbedingungen (Sicherheitsrelevanz, Betriebsrelevanz etc.) Der in Abbildung 20 aufgezeichnete Entscheidungsprozess umfasst die wesentlichen Fragestellungen, mit deren Hilfe die aus (sicherheits-)technischer und betrieblicher Sicht möglichen Instandhaltungsstrategien identifiziert werden können. Das Ergebnis einer solchen systemtechnischen Analyse ist Eingangsgröße bei Anwendung des im Rahmen dieser Arbeit aufgestellten Bewertungskonzepts. Wie eine solche fallspezifische Analyse vorzunehmen ist, wird verständlich in einschlägiger Literatur aufgearbeitet [Har95]; [Stu96]; [War81]³⁵. Abbildung 20 verdeutlicht, dass die kritischen Einheiten einer Betrachtungseinheit die Möglichkeiten der Instandhaltung bestimmen. Kritische Einheiten sind dadurch gekennzeichnet, dass sie entscheidend Einfluss auf die Sicherheit und Betriebstauglichkeit der Betrachtungseinheit nehmen (vgl. Abschnitt 4.4.2). Besteht das System ausschließlich aus unkritischen Einheiten, ist eine zufällige oder ausfallorientierte Instandhaltung denkbar. Für die Systeme der Bahnsicherungstechnik kommt die zufällige Instandhaltung aufgrund ihrer verteilten Struktur und hohen betrieblichen Sicherheitsanforderungen eher nicht in Frage. Eine ausfallorientiert Instandhaltung ist nur in besonderen Fällen denkbar (z. B. bei Anlagen auf kaum benutzten Schienenfahrwegen). Werden sicherheitskritische und/ oder funktionskritische Einheiten identifiziert, sollte wenn möglich eine präventive Instandhaltungsstrategie gewählt werden. Je nachdem, ob eine Zustandserfassung technologisch möglich und/ oder betriebswirtschaftlich sinnvoll ist, sind neben der zeitabhängigen präventiven Instandhaltung die zustandsorientierte Instandhaltung durch Inspektion oder durch ONLINE-Monitoring (vgl. Abschnitt 4.4.2) möglich. In diesem Fall sind alle vier Grundstrategien prinzipiell denkbar.

³⁵ Zusätzlich kann auf bestehende Lösungen für eine EDV-Unterstützung bei einer solchen technischen Analyse von Instandhaltungsstrategien zurückgegriffen werden [BR93].

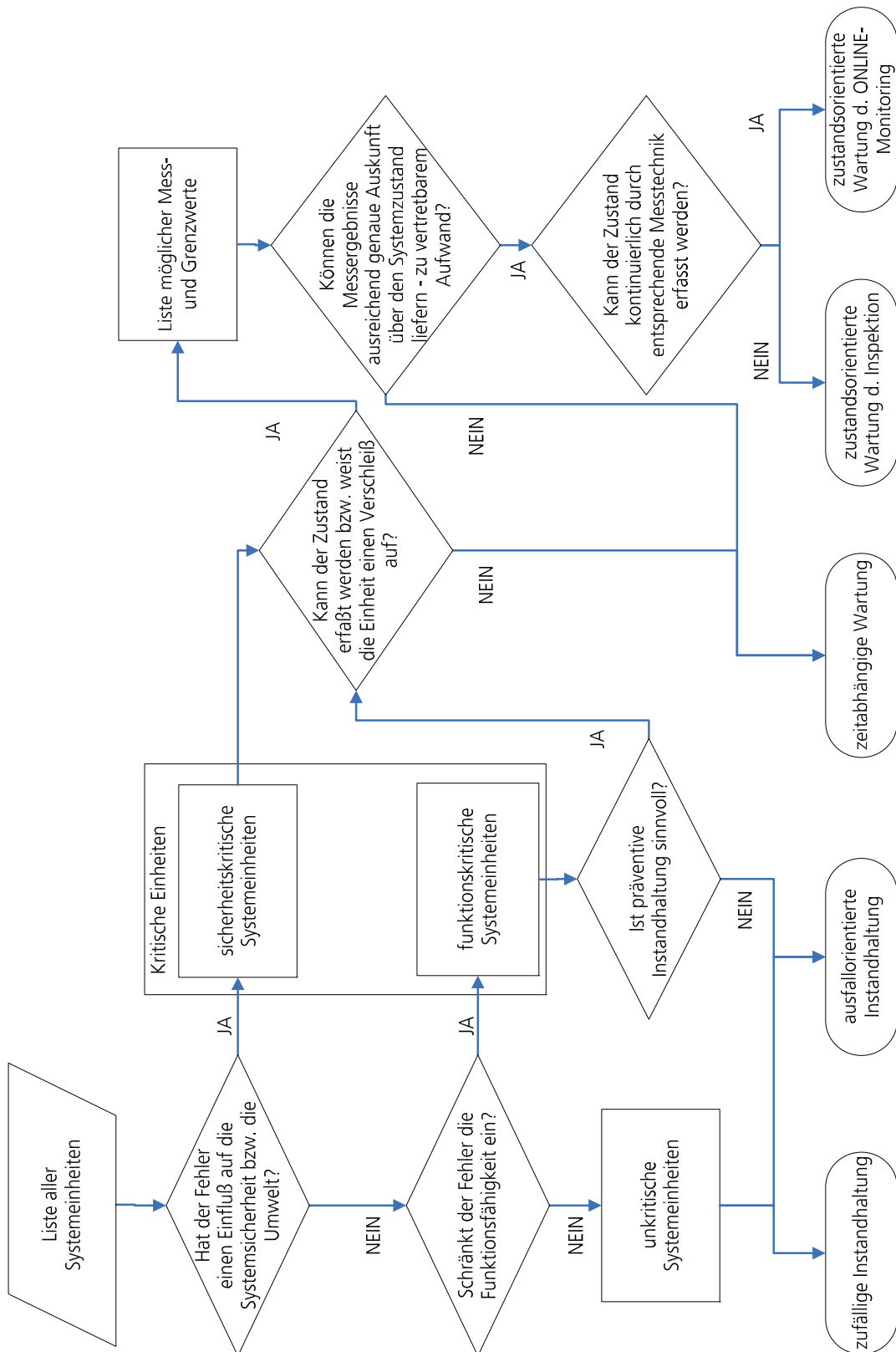


Abbildung 20: Instandhaltungsstrategieauswahl (in Anlehnung an [Har95], S. 142, [Stu96], S. 111)

Entsprechend umfangreich sollte die Strategiebewertung ausfallen, um eine möglichst weit-sichtige Wahl der Instandhaltungsstrategie zu treffen. Im Umkehrschluss gilt, dass wenn mit Hilfe der in Abbildung 20 dargestellten Auswahl-systematik keine in ihrem Zustand überwachbaren Einheiten identifiziert werden, eine zustandsabhängige Instandhaltung nicht in Frage kommt. Diese Strategie ist dann weder zu modellieren noch zu bewerten. Die Strategieauswahl ist weniger umfangreich.

Daneben unterstützt der in Abbildung 20 abgebildete Ablaufplan den Verantwortlichen in der Aufstellung alternativer Instandhaltungsstrategien. Erlaubt das System bspw. sowohl eine zeit- als auch eine zustandsabhängige Instandhaltung, ist die Aufnahme eines Strategiemix aus zeit- und zustandsabhängiger präventiver Instandhaltung in die Modellierung und Bewertung denkbar. Wie bei der Definition alternativer, das heißt von den Grundstrategien abweichenden Instandhaltungsstrategien vorgegangen werden kann, wird hier nicht erläutert. Es handelt sich um eine komplexe, vielschichtige Aufgabe, die ein Wissensgebiet für sich darstellt. Unterstützende Leitfäden zur Strategiedefinition finden sich u. a. in [Kel97]. Der Kern dieser Arbeit ist die Bewertung denkbarer, bereits definierter Instandhaltungsstrategien und die Selektion der für das Investitionsszenario geeigneten. Bei der Veranschaulichung der Methodik anhand des Anwendungsbeispiels (siehe Kapitel 6) wird sich deshalb auf die Grundstrategien beschränkt.

Dem Entscheider verdeutlicht das Ergebnis aus Abbildung 20, welches Strategieportfolio ihm grundlegend über die Nutzungsdauer der Betrachtungseinheit zur Verfügung steht und erleichtert ihm somit, Entscheidungen bei eventuell notwendiger Anpassung in der Instandhaltung mit fortschreitendem Systemalter zu treffen.

Bevor mit Abschnitt 4.7 die Vorgehensweise der Instandhaltungsstrategiebewertung verdeutlicht wird, soll anhand eines kurzen Abrisses über die derzeitige Praxis in der Instandhaltung der Bahnsicherungstechnik sowie den bestehenden Herausforderungen die Notwendigkeit für einen neuen Ansatz in der Strategiebewertung untermauert werden.

4.6 Instandhaltung von Bahnsicherungstechnik

Die jährlichen Aufwendungen für die Instandhaltung des etwa 37.500 km langen deutschen Schienennetzes betragen etwa 1,25 – 1,5 Milliarden Euro [DB06c]. Eine von der UIC-Infrastruktur-Kommission beauftragte Studie zeigt, dass individuell angepasste Optimierungsmaßnahmen bei der Instandhaltung des Schienennetzes Einsparungen zwischen 20 bis 30 Prozent erwarten lassen [UIC02b]. Eine Optimierung der Instandhaltung von Bahnsicherungstechnik ist ein Ansatzpunkt, um durch eine Senkung der Instandhaltungskosten zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit und damit Wettbewerbsfähigkeit des Systems Schiene beizutragen. So wurden u. a. in einem vom BMBF geförderten Projekt [DB06c] die wirtschaftlichen Auswirkungen des Einsatzes mobiler Informations- und Kommunikationstechnologien im Instandhaltungsprozess der DB Netz AG untersucht. Die erzielbaren Effekte aus einer möglichst frühzeitigen, in den Investitionsentscheidungsprozess integrierten Betrachtung und Bewertung von Instandhaltungsstrategien wurden hingegen bisher nicht analysiert, obwohl die

aktuelle Situation und die langen Nutzungsdauern der Bahnsicherungstechnik große Kostensenkungspotentiale in der Instandhaltung erwarten lassen.

So erfolgt die Instandhaltung der bahnsicherungstechnischen Anlagen heute vorrangig zeitabhängig. Begründet wird dies mit der Notwendigkeit einer besseren Prozessplanbarkeit, die sich laut Prozessverantwortlichen aus

- der Tatsache, dass es nur bestimmte Zeitfenster gibt, in denen Wartungsarbeiten ohne Störung des Normalbetriebs durchgeführt werden können und
- limitierten Personalressourcen und damit eingeschränkter Prozessflexibilität

ergibt. Die Instandhaltung der Anlagen an den Strecken der DB Netz AG wird durch die Konzernrichtlinie 892 [DB06b] geregelt und wird nach einer festgeschriebenen Prozessabfolge organisiert ([DB06c], S. 16 ff.). In KoRil 892 sind zum einen Zeiträume zwischen zyklischen Überprüfungen (Inspektionen) als auch konkrete Maßnahmen, die nach Ablauf einer Frist zu erfolgen haben, festgelegt. Nach dieser Konzernrichtlinie erfolgt eine Differenzierung der Maßnahmen für ein Fahrwegsicherungselement in Abhängigkeit der Streckenbelastung³⁶. Die Annahme, dass mit diesem belastungsorientierten Ansatz der Anlagenzustand in ausreichendem Maße Berücksichtigung findet, wurde widerlegt [BJL07].

Langjährige Erfahrungen bestätigen, dass sich dieses unternehmensinterne Regelwerk hinsichtlich der Sicherheitsanforderungen bewährt hat. Gleichzeitig zeigen entsprechende Untersuchungen, dass es aus unternehmerischer Sicht in Form angepasster Inspektionszyklen verbessert werden muss, damit die Instandhaltung der Bahnsicherungstechnik ihren Beitrag zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit liefern kann [KR01]. Grund für die notwendige Prozessoptimierung liegt zum einen in der geringen Differenzierung der Systeminstandhaltung hinsichtlich der Art, Umfang und Häufigkeit der planmäßigen Untersuchungen in Abhängigkeit von Zustand, Belastung und Streckengeschwindigkeit sowie Umweltbedingungen, wie es laut §17 EBO [PWH+01] möglich ist [BJL07]. Zum anderen orientiert sich der größte Systembetreiber in Deutschland (DB Netz AG) bei der Festlegung der Wartungsintervalle vorrangig an den Empfehlungen der Signaltechnikhersteller. Damit läuft man Gefahr, dass man mitunter überzogenen Vorgaben (zu kurze Fristabstände) folgt, die im Sinne einer guten Produktpositionierung vom Systemhersteller definiert werden ([Ada89], S. 68). Zudem können die herstellerspezifischen Vorgaben nur bedingt die tatsächlichen Betriebsbedingungen berücksichtigen.

Unter Verwendung der KoRil 892 kalkuliert die DB Netz AG mit 10 Prozent der gesamten Instandhaltungskosten für korrektive Instandhaltungsmaßnahmen. Dieser vergleichsweise geringe Anteil ist aus Sicht der Verfügbarkeit positiv auszulegen. Dennoch lässt er vermuten, dass viele Instandhaltungsmaßnahmen zu früh durchgeführt werden, entsprechend die Komponente noch einen überdurchschnittlich guten Zustand und damit einen hohen Restabnutzungsvorrat aufweist. Effizienzverluste sind die Folge (vgl. Abbildung 18).

Aufgrund dieser Zusammenhänge und den aktuellen Marktentwicklungen lässt sich im Instandhaltungsmanagement sicherungstechnischer Anlagen zunehmend der Wunsch nach

³⁶ Je nach Anzahl der verkehrenden Züge und Lasttonnen erfolgt die Einteilung der Strecke und seiner Infrastruktur in eine der drei Belastungsgruppen starker, mittlerer oder schwacher Verkehr.

Alternativen in der Instandhaltung beobachten [DB06c]. Daneben schaffen die hohen Instandhaltungspersonalkosten von knapp 60 Prozent der gesamten Instandhaltungskosten große Anreize für alternative Instandhaltungsverfahren, mit denen sich eine höhere Personaleffizienz erzielen lässt [Sta01]. Dabei orientiert man sich zum einen an den Entwicklungen bei ausländischen Netzbetreibern [Zwa07]; [RB03] als auch an den anderen Bereichen der Deutschen Bahn AG wie etwa dem Bereich der Schienenfahrzeuge [LB06]; [HT07] oder dem Oberbau. Hier fanden und finden seit geraumer Zeit Untersuchungen statt, wie der Instandhaltungsprozess wirtschaftlicher gemacht werden kann, ohne ein nachteiliges Ausfallverhalten und damit eine steigende Anzahl von Verspätungen zu riskieren oder die Systemsicherheit zu schmälern.

Eine Vorreiterrolle im Bereich der Bahnsicherungstechnik nimmt derzeit das System Weichenantrieb ein. So werden mit Hilfe von Diagnosesystemen ausgewählte Weichen inklusive Weichenantriebe in ihrem Zustand überwacht. In der UIC-Studie „EcoSwitch“ sind die derzeit im europäischen Raum verbauten Weichendiagnosesysteme aufgelistet und beschrieben ([UIC02a], S. 36 ff.). Im Netz der Deutschen Bahn ist vorrangig das System SIDIS W® der Siemens AG im Einsatz [Sie98a]. Daneben werden in Teilen der ROADMASTER 2000® von VAE und das System POSS® von Strukton Railinfra verwendet. Dabei handelt es sich jedoch stets nur um prozessbegleitende Einsätze, die Instandhaltung von Weichenantrieben erfolgt nach wie vor zeitabhängig nach KoRil 892. Die eingesetzten Systeme unterscheiden sich zwar in Teilen in ihrer Ausführung, ihr Funktionsprinzip ist jedoch weitestgehend identisch. Durch die Überwachung des Weichenmotorstroms wird der notwendige Kraftaufwand für den Umstellvorgang an sensiblen Punkten im Zungen-, Herzstück- und Weichenantriebspunkt ersichtlich. Durch den Abgleich mit hinterlegten Referenzwerten lassen sich kurz- oder längerfristig abzeichnende Störungen erkennen. Damit kann der Zustand der Weichenkonstruktion von der Ferne beurteilt werden. Durch den Einsatz dieser Systeme konnten die Anzahl an Störungen von Weichenantrieben nachweislich gesenkt werden. Daneben erlauben die Diagnosedaten eine schnellere Fehlererkennung durch genauere Informationen. Dies wiederum senkt im Falle einer Störung die Zeit für die Fehlerbehebung [RB03]. Die Ergebnisse aus der Praxis belegen nachweislich, dass mit Hilfe einer zustandsabhängigen Instandhaltung die Instandhaltungskosten für Weichenantriebe gesenkt werden. Dennoch erfolgt die Instandhaltung von Weichenantrieben im Netz der DB AG nach wie vor rein zeitabhängig. Begründet wird dies derzeit mit den notwendigen Nachweisen, die bei einer Fristenspreizung dem EBA vorzulegen sind. Von Seiten des EBA steht einer solchen Prozessoptimierung im Instandhaltungsmanagement bei gegebener Sicherheit prinzipiell nichts entgegen [KR01]. Eine zustandsabhängige Instandhaltung ausschließlich auf Basis der Informationen aus Diagnosesystemen (ONLINE-Monitoring) ist jedoch derzeit noch nicht möglich. Es gibt noch Systemzustände, die von den bestehenden Diagnosesystemen nicht überwacht werden können und somit Vorort-Inspektionen notwendig machen. Um die wirtschaftlichen Vorteile von Diagnosesystemen auch bei den anderen sicherungstechnischen Anlagen nutzen zu können, werden derzeit Entwicklungen weiterer Diagnosesysteme forciert. So gibt es aktuell erste Erfahrungen mit der Diagnose von Signalzuständen [Fri04]. Der Erfahrungsstand hierzu ist jedoch verglichen zu Weichendiagnosesystemen gering. Daneben existieren Überwachungssysteme für Weichenheizungen und Bahnübergänge. Hierbei handelt es sich jedoch weniger um eine Zustands-

überwachung, sondern um ein Warnsystem³⁷, das lediglich bei bereits entstandenen Fehlern detailliert informiert. Mit den Informationen kann eine Differenzierung der vorliegenden Störungsmeldungen hinsichtlich ihrer Dringlichkeit vorgenommen werden. Damit ermöglichen diese Systeme keine Prognose von Störereignissen, sondern ausschließlich einen optimierten Einsatz von Instandhaltungspersonal.

In Summe wird deutlich, dass große Potentiale zur Effizienzsteigerung des Instandhaltungsprozesses von Bahnsicherungstechnik vorhanden sind und diese mittelfristig analog zu den Bereichen der Fahrwegs- und Oberleitungsinstandhaltung im DB-Konzern abzuschöpfen sind. Erste Bestrebungen zur Umsetzung sind zu beobachten.

Für die Betrachtung alternativer Instandhaltungsstrategien im Rahmen von Investitionsentscheidungen geht es zunächst primär darum, die denkbaren Instandhaltungsstrategien für die Bahnsicherungstechnik abzubilden und zu bewerten (siehe Abschnitte 4.7 und 6.3). Ihre praktische Umsetzung soll an dieser Stelle nur unter dem Blickwinkel der prinzipiellen Machbarkeit betrachtet werden.

Aufbauend auf den Hintergrundinformationen, erfolgt im nun folgenden Abschnitt die Beschreibung der Instandhaltungsstrategiemodellierung und darauf aufbauend die Bewertung. Abschnitt 4.7 bildet gemeinsam mit dem Investitionsstrategiebewertungsverfahren (Abschnitt 3.2.3) die Grundlage für eine integrierte Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien (vgl. Abschnitt 1).

4.7 Modellierung und Bewertung von Instandhaltungsstrategien

Die Modellierung stellt ein wichtiges Element in der hier erarbeiteten Bewertungsmethodik dar. Zum einen sind für eine Instandhaltungsstrategiemodellierung grundlegende Kenntnisse zu Instandhaltung, Zuverlässigkeit und den prinzipiellen Instandhaltungsstrategien notwendig. Daneben ist das Verständnis von den in der Instandhaltung ablaufenden Prozessen und den Verknüpfungen zwischen den Prozessschritten und Handlungen unablässig. Dazu dienen die vorangegangenen Abschnitte 4.1 bis 4.5. Sind diese Punkte verinnerlicht, gelingt es mit Hilfe von Modellierung und Simulation das zukünftige Prozessverhalten zu antizipieren, die Konsequenzen bestimmter Aktionen zu veranschaulichen und somit den Grad der Zielerfüllung (Kostenminimierung, Systemverfügbarkeit maximieren etc.) abzuschätzen und die Instandhaltungsstrategien bezüglich ihrer Eignung (vgl. Abbildung 17) zu bewerten. Werden diese Informationen wie in der integrierten Bewertung vorgesehen zum Zeitpunkt der Investition berücksichtigt, ist die gewonnene Entscheidungsgrundlage für Investitionen in Bahnsicherungs-

³⁷ Im Gegensatz zu Diagnosesystemen, die den Zustand eines Systems anhand von Messwerten detailliert beschreiben, erlauben Warnsysteme lediglich eine Aussage über die Funktionsfähigkeit des überwachten Systems. In der Praxis wird diese Unterscheidung mitunter nicht gemacht. In solchen Fällen werden auch Warnsysteme als Diagnosesysteme verstanden.

technik umfassender und qualitativ hochwertiger als bei Verwendung von derzeit in der Praxis üblichen Verfahren.

4.7.1 Ziel der Modellierung

Mit der Modellierung wird die Grundlage für die Bewertung der Instandhaltungsstrategien geschaffen. Um wirtschaftlich sinnvolle Entscheidungen treffen zu können, sind die vielfältigen Abhängigkeiten zwischen Systemzustand, Betriebsumfeld (inkl. der benachbarten Systeme und Ressourcenbeschränkungen) und Instandhaltungsmaßnahmen abzubilden [Pro02]. Mit den abgebildeten Ursache-Wirkungsprinzipien können die Auswirkungen der mit den einzelnen Instandhaltungsstrategien verbundenen Maßnahmen auf den Zustand der Betrachtungseinheit und damit auf dessen Verfügbarkeit und Instandhaltungskosten über die gesamte Nutzungsdauer antizipiert werden. Damit wird der Unterschied des Modellierungsansatzes zu der Vielzahl bestehender Instandhaltungsmanagementlösungen (vgl. u. a. [Stu96], S. 138 ff.) deutlich. Deren Aufgabe liegt in der zeitnahen Auswertung von Beanspruchung und Zustandsveränderungen.³⁸ Sie unterstützen im unmittelbaren Systemeinsatz und haben eine detaillierte Sichtweise [Los96]. Da ein solcher Ansatz aufgrund fehlender Daten im Rahmen von Investitionsentscheidungen nicht möglich ist, muss eine neue Lösung geschaffen werden [Gut09a]. Mit der Strategiemodellierung, wie sie als Teil der Bewertungsmethodik zur integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien vorgesehen ist, wird ein umfassendes Verständnis des komplexen Entscheidungsumfelds für ein Gesamtsystem (z. B. Netzabschnitt des Schienennetzes) geschaffen. Mit seiner strategischen Ausrichtung und seiner Aufgabe im Investitionsentscheidungsprozess handelt es sich, im Gegensatz zu den bestehenden Lösungen, demzufolge bei der Strategiemodellierung und -bewertung weniger um ein betriebsbegleitendes Instrumentarium. Entsprechend darf an die Modellierung auch nicht der Anspruch einer exakten Bestimmung der Instandhaltungsaufwendungen gestellt werden, vielmehr hat sie eine umfassende Bewertung zum Ziel. Ersteres ist in Anbetracht des veränderlichen betrieblichen Umfelds und des langen Betrachtungszeitraums zum Investitionszeitpunkt nicht möglich. Außerdem bleiben einzelne Aspekte wie etwa die Auswirkungen von menschlichen Fehlhandlungen oder Vandalismus unberücksichtigt. Sie stehen in keinem Zusammenhang zur Instandhaltungsstrategie und sind nicht vorab abzuschätzen.

Gleichzeitig grenzt sich dieser Modellierungsansatz, dessen Fokus ausschließlich auf der Instandhaltung i. e. S. (vgl. Abschnitt 4.4) liegt, von aktuellen Bestrebungen der Instandhaltungsprozessoptimierung im Bereich der Eisenbahninfrastruktur ab [DB06c].

4.7.2 Modellbausteine

Um dem Anspruch einer Strategiebewertung gerecht zu werden, sind die erfolgswirksamen Faktoren zu bestimmen und ihr Verhalten zu beschreiben. Aufbauend auf den Abschnitten 4.1 bis 4.4 können folgende vier Modellbausteine identifiziert werden.

³⁸ Beispielhaft seien für den Schienenfahrweg die Softwarelösungen POSS®, IRISSYS®, vips® genannt.

1. Zustandsbeschreibung über den gesamten Betriebszeitraum
2. Abbildung notwendiger Instandhaltungsmaßnahmen
3. Erfassung der Systemverfügbarkeit
4. Bestimmung von Kosteneintritt und -höhe und des Personalbedarfs

Mit ihnen wird man der grundlegenden Erkenntnis gerecht, dass Art und Zeitpunkt der Instandhaltungsmaßnahmen die Wirtschaftlichkeit einer Instandhaltungsstrategie und damit das Strategiebewertungskriterium Instandhaltungskosten bestimmen (vgl. Abbildung 15).

Abbildung 21 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen den vier Bausteinen und deren Bezug zum Bewertungsziel der minimalen Instandhaltungskosten. In der Größe Instandhaltungskosten sind die Auswirkungen der relevanten Instandhaltungsszenarien (Ausfall, Wartung etc.) abgebildet (siehe Abschnitt 4.3). Zudem ermöglicht diese Zahl einen objektiv nachvollziehbaren Strategievergleich. Kern der Modellierung ist die Systemabbildung mit den Zuständen der Systemeinheiten in Abhängigkeit vom Schädigungsverhalten. Dieses bestimmt sich durch Nutzungszeit, Beanspruchung und Instandhaltungsintensität. Den Ausführungen in den Abschnitten 4.1 und 4.2 folgend, lässt sich mit der Zustandsbeschreibung zu einer Aussage zur Systemverfügbarkeit treffen. Zum anderen bedarf es der Zustandsbeschreibung zur Abbildung von zustands- und ausfallorientierter Instandhaltung sowie der Auswirkungen der Instandhaltungsmaßnahmen auf den Systemzustand (vgl. Abschnitt 4.4). Mit der Abbildung der Systemverfügbarkeit, der Instandhaltungsereignisse und der Auswirkungen der Maßnahmen auf den Zustand sowie auf Instandhaltungskosten und Personalbedarf ermöglicht die Modellierung die Bewertung der Instandhaltungsstrategien.

Dabei ist die Modellierung für die Bewertung von Basis- und kombinierten Instandhaltungsstrategien (vgl. Abschnitt 4.4) gleichermaßen geeignet. Auftretende Veränderungen im Systemumfeld (Beanspruchung, Betriebszeit etc.), die während der langen Lebensdauer der Anlage eintreten können und eventuell zum Investitionszeitpunkt vorhersehbar sind, können in das Modell eingepflegt und Strategieanpassungen analysiert werden [vgl. [Kel97], S. 167 ff.].

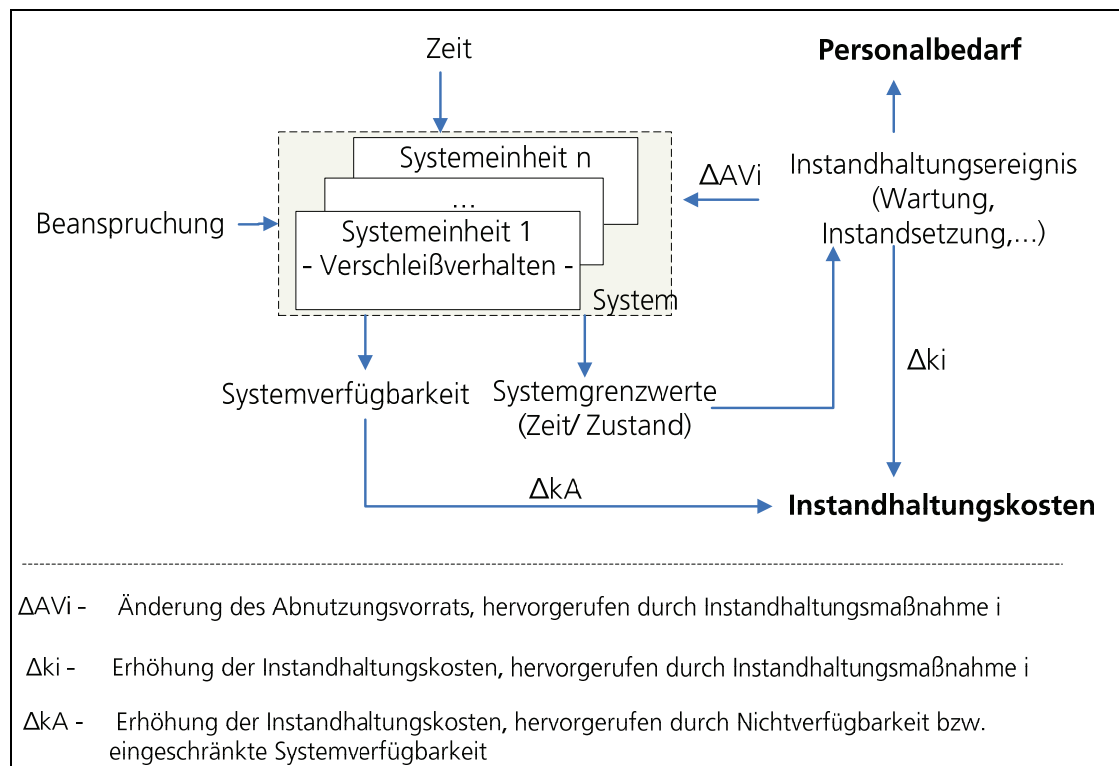


Abbildung 21: Modellbausteine

Mit Abbildung 21 wird deutlich, dass keine separate Erfassung der Systemsicherheit erfolgt. Es wird vorausgesetzt, dass mit der Zustandsbeschreibung die Sicherheit fortlaufend überwacht und bei Sicherheitsmängeln in Form einer Nichtverfügbarkeit des Systems oder fälligen Instandhaltung monetär bewertet wird. Die Bewertung der Instandhaltungsstrategien erfolgt anhand der Größe Instandhaltungskosten (direkt und indirekt, vgl. Abschnitt 4.3) und dem Personalbedarf. Die verfügbaren Personalressourcen stellen in der Praxis eine Grenze der maximal durchführbaren Instandhaltungsmaßnahmen pro Zeiteinheit dar und sind in einer Strategiebewertung separat zu berücksichtigen. Im Umkehrschluss lassen diese Informationen auch Rückschlüsse auf mögliche Personaleinstellungen oder -streichungen zum Zeitpunkt der Investition zu. Dies unterstreicht die Tatsache, dass dieses Bewertungsverfahren nicht nur eine hervorragende Unterstützung im Investitionsentscheidungsprozess darstellt, sondern auch für die Beantwortung von darüber hinaus gehenden Fragestellungen genutzt werden kann.

4.7.3 Modellaufbau und Bewertung

Zum Modellaufbau empfiehlt sich die Verwendung von System Dynamics. System Dynamics ist ein von J. W. FORRESTER entwickeltes Konzept zur Systembeschreibung mittels bestehender Ursache-Wirkungsbeziehungen [For69]. Mit Hilfe von System Dynamics soll eine Reduzierung der Komplexität realer Systeme erreicht werden und damit das Systemverständnis gesteigert werden. Dabei eignet sich dieses Konzept im Besonderen für Problemstellungen, die aufgrund fehlender Informationen bzw. Systemkenntnis schwer exakt mathematisch beschreibbar sind. Dies trifft für die Bewertung von Instandhaltungsstrategien zu (vgl.

[SSK92]). Die Vielschichtigkeit der Zusammenhänge in der Instandhaltung und dessen Bezug zur Investitionsstrategieselektion (vgl. Abbildung 26) macht die Prozessmodellierung zu einer komplexen Aufgabe, für deren Bearbeitung der Einsatz von Simulation notwendig wird (vgl. Anhang B).

STERMAN beschreibt das Ziel von System Dynamics im Instandhaltungsmanagement wie folgt: „Using the model as a laboratory to design and test different policies [...] to develop an appreciation for the dynamic complexity of the maintenance system“ ([Ste00], S. 67). Dass System Dynamics in geeigneter Weise das Instandhaltungsmanagement im Schienenverkehr unterstützen kann, zeigen die Ausführungen von SCHMIDT et al. [SSK92]. SCHMIDT benennt für eine Modellierung mit dem Konzept System Dynamics folgende vier Arbeitsschritte:

1. Zusammentragen von Systeminformationen und -zusammenhängen,
2. Projektion der Entwicklung komplexer Realsysteme,
3. Erklärung des Systemverhaltens,
4. Abschätzung der Wirkungsweise von Strategien ([Sch92], S. 109).

Übertragen auf die Modellierung von Instandhaltungsstrategien bedeutet dies, dass neben den Kenntnissen von System und Umfeld (1.) die Veränderung der Betrachtungseinheit in Form einer Zustandsbeschreibung (Abnutzungsvorrat) und des Umfelds (Änderungen in der Beanspruchung etc.) (2.) die Grundlage bilden. Sind die Ursachen für die systemischen Veränderungen bekannt (3.), kann man die möglichen Instandhaltungsstrategien (vgl. Abschnitt 4.5) abbilden und hinsichtlich ihrer Wirkungsweise und ihres Zielerfüllungsgrads (niedrige Kosten, vgl. Abbildung 17) durch Simulation bewerten (4.). Diese vier Arbeitsschritte bilden somit den Leitfaden für Modellaufbau und Strategiebewertung und werden nachfolgend näher erläutert.

In Abbildung 22 sind die für die Instandhaltung geltenden Ursache-Wirkungsbeziehungen zwischen Zustand der Betrachtungseinheit, den Instandhaltungsmaßnahmen und den sie verursachenden Kosten zusammengetragen. Neben der Wirkrichtung (Pfeilspitze) sind in der Grafik die Wirkungsweisen erfasst. Dabei gilt bei positiver Wirkungsweise (+), dass sich der beeinflusste Aspekt erhöht, wenn sich der Verursacher erhöht bzw. verringert wenn sich der Verursacher verringert. An einem Beispiel veranschaulicht bedeutet dies, dass mit Zunahme der Instandhaltungsmaßnahmen die (direkten) Instandhaltungskosten steigen. Im Umkehrschluss gilt bei negativer Wirkungsweise (-), dass der beeinflusste Aspekt sinkt wenn der Verursacher steigt und umgekehrt. So hat bspw. eine erhöhte Verfügbarkeit sinkende indirekte Instandhaltungskosten zur Folge. Abbildung 22 stellt das Grundgerüst des Modells dar. Die erfassten Verknüpfungen sind in der Simulationsumgebung³⁹ entsprechend hinterlegt.

³⁹ Im Rahmen dieser Arbeit wird aufgrund des gebotenen Funktionsumfangs und seiner Bedienbarkeit Anylogic® (Version 6.2) verwendet. Ebenfalls denkbar ist der Einsatz von iThink/STELLA, DYNAMO, Vensim oder Powersim. Sie sind z. T. ähnliche Softwareprodukte, mit denen das Konzept System Dynamics umsetzbar ist.

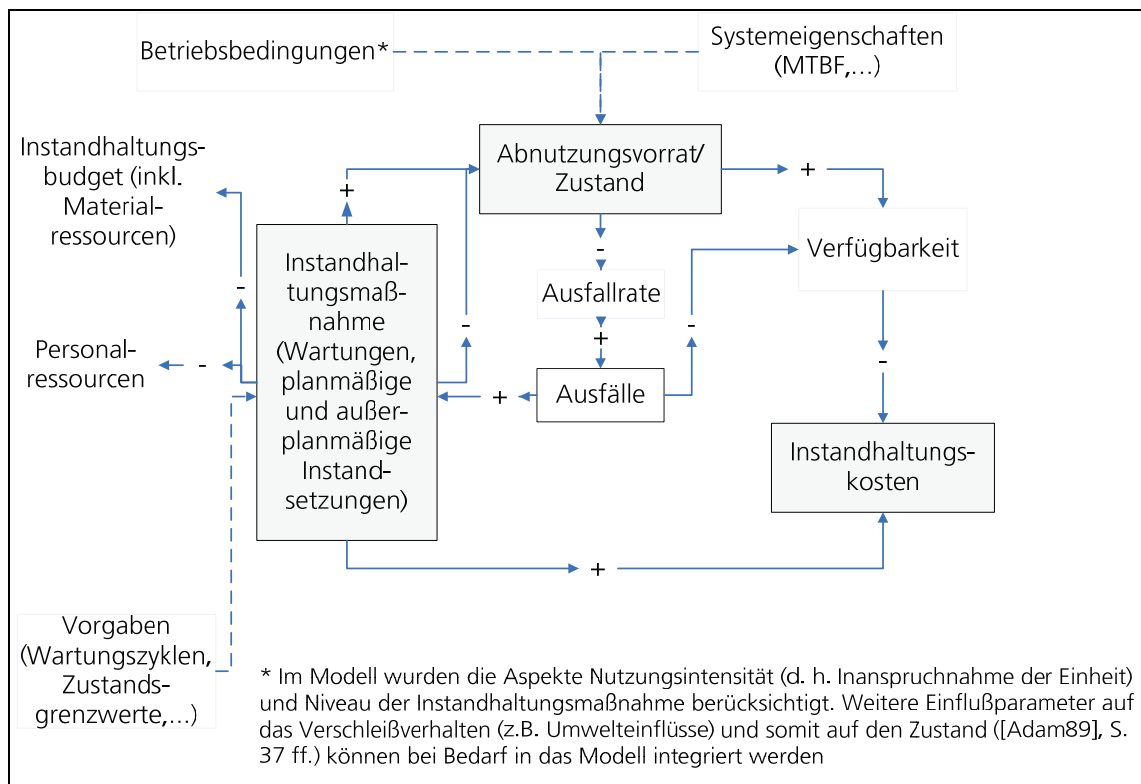


Abbildung 22: Ursache-Wirkungsbeziehungen Instandhaltung

Da die Zustandsbeschreibung zum Investitionszeitpunkt erfolgt, können keine Informationen über Messsysteme aus dem aktuellen Betrieb der Betrachtungseinheit verwendet werden. Der Entscheider hat lediglich die Wahl zwischen der Verwendung historischer Daten oder von Zustandsinformationen, die aus Testläufen gewonnen werden, um das zu erwartende Zustandsverhalten der Betrachtungseinheit zu simulieren. Während historische Daten aus dem Betrieb eines gleichen Systems⁴⁰ unter gleichen oder sehr ähnlichen Einsatzbedingungen (z. B. Einsatzart, Umwelteinflüsse) gewonnen werden, erhält man Testlaufergebnisse aus einem der Realität nachempfundenen Laborumfeld. Mit beiden Ansätzen lässt sich die weit verbreitete alleinige Verwendung von statistischen Kennzahlen wie MTBF (Mean Time Between Failures) oder MTTR (Mean Time To Repair) vermeiden. Mit ihnen ist keine Zustandsbeschreibung ähnlich dem Abnutzungsvorrat möglich. Der Zustand sollte jedoch das Maß bei der Bewertung von Instandhaltungsstrategien sein ([Vol03], S. 29 f.) (vgl. Abschnitt 4.2). Zudem können die benannten statistischen Kennzahlen für Anlagen der Bahnsicherungstechnik aufgrund der langen Lebensdauern in der Regel nur mathematisch (z. B. mit Hilfe DIN IEC 61709) bestimmt werden. Die somit gewonnenen Kennzahlen sind ungenauer und ermöglichen nur in Ansätzen die Berücksichtigung von System- und Einsatzspezifika. Natürlich bedingt eine solche Zustandsbeschreibung auch, dass entweder historische Daten vorhanden sind (bei einer Neuentwicklung schwierig) oder Testläufe durchgeführt wurden bzw. durchführbar sind.

Ist die Betrachtungseinheit in seinem Zustandsverhalten und seinen externen wie internen Einflussgrößen erfasst, sind zum einen die strategieabhängigen, Instandhaltungsmaßnahmen

⁴⁰ Wichtig ist hierbei die Übereinstimmung in Redundanzen, Alter/ Anfangsqualität und Material mit der Betrachtungseinheit

auslösenden Kriterien (vgl. Abschnitt 4.4) im Modell zu hinterlegen. Zum anderen ist im Modell zu beschreiben, wie die Instandhaltungsmaßnahmen im Auslösefall aussehen. Dazu gehört die Beschreibung von

- Umfang der Maßnahme,
- Grad der Zustandsverbesserung,
- Einfluss auf Verfügbarkeit und
- Einfluss auf Kosten. (vgl. Abbildung 22)

Damit ist die Beschreibung der Instandhaltungsstrategie im Modell vollständig und die Strategiebewertung kann erfolgen.

Für die Bewertung der Strategien ist entsprechend Abbildung 17 das Zielkriterium minimalster Gesamtaufwendungen⁴¹ als Summe aus direkten und indirekten Instandhaltungskosten im Modell zu hinterlegen (vgl. Abschnitt 4.3). Daneben wird im Modell der Personalbedarf gesondert erfasst. Dies dient in erster Linie der Machbarkeitsüberprüfung. Wird in einem Zeitintervall für die Durchführung einer Strategie mehr Personal als dem Unternehmen verfügbar benötigt, so kann diese Instandhaltungsstrategie nicht weiter verfolgt werden.⁴² In Abschnitt 4.3 sind die direkten und indirekten Instandhaltungskosten in ihrer Theorie beschrieben. Mit diesem Wissen ist das Modell auszulegen. Zur Erfassung der direkten Instandhaltungskosten werden für jedes Instandhaltungsereignis

- Personalkosten (berechnet anhand der Anzahl des benötigten Personals, der Einsatzdauer und des Personalstundensatzes),
- Materialkosten (inkl. Kosten für Werkzeuge und Messtechniken) und
- Kosten für Melde- und Wegezeiten

hinterlegt.

Bei der Bestimmung der indirekten Instandhaltungskosten beruht das Modell auf dem Konzept der Betriebserschwerungskosten (BEK)⁴³. Jedoch erfolgt keine Berücksichtigung einer möglichen funktionalen Verkettung zwischen der gestörten und anderen Bahnsicherungsanlagen. Damit einhergehende Auswirkungen auf die Dauer der Betriebsstörung bleiben außen vor. Im Modell wird davon ausgegangen, dass planmäßige Instandhaltungen außerhalb der Betriebszeiten durchgeführt werden und somit keine BEK verursachen. Entgegengesetzt verhält es sich beim Ausfallereignis. Bei einem Ausfall wird eine Instandsetzung im Modell ausgelöst. Die Instandsetzungsdauer spielt dann nicht nur eine Rolle bei der Berechnung der Personalkosten. Gleichzeitig ist festgelegt, dass im Falle eines

⁴¹ Daneben sind auch andere Zielfunktionen denkbar (vgl. [Stu96], S. 89). Diese sind aber für die Investitionsentscheidung von untergeordneter Bedeutung.

⁴² Eine Alternative hierzu wäre die zeitlich befristete Integration von Leiharbeitern in das Unternehmen.

⁴³ Betriebserschwernisse und damit Betriebserschwerungskosten (BEK) umfassen den durch Betriebsbehinderungen verursachten betrieblichen Mehraufwand (z. B. Kosten für Schienenersatzverkehr). Genaue Betrachtungen zum Konzept der Betriebserschwerungskosten sind unter anderem in [Ack98] und [Eng86] zu finden. Im Rahmen der Modellierung und Bewertung werden die von der DB AG ermittelten Kostensätze für Verspätungsminuten in Abhängigkeit der Streckenkategorie verwendet.

Ausfalls die Instandsetzungsdauer mit der Dauer einer Betriebsstörung gleichgesetzt wird und sich danach die Höhe der BEK richtet. Der Fall, dass Ausfälle auch in Betriebspausen auftreten können und in diesem Fall keine Verzögerungen im Betriebsablauf auftreten, wird somit nicht differenziert betrachtet.

Neben den intrasystemischen Abhängigkeiten sind in einem durchdachten Instandhaltungskonzept auch intersystemische Abhängigkeiten zu bedenken und in die Bewertung einzubeziehen. Während sich Abbildung 21 und Abbildung 22 auf die Ursache-Wirkungsbeziehungen bei der Instandhaltung *eines* Systems beziehen, verdeutlicht Abbildung 23 die Einordnung des Systems in das Instandhaltungsmanagement einer Anlage bzw. eines gesamten Netzes. Ausgehend von dem durch Systemstrukturierung und -zustandsmodellierung gewonnenen Modellaufbau erfolgt die Simulation der möglichen Instandhaltungsstrategien für das System (A).

Stellt das System einen Teil einer Anlage bestehend aus mehreren Systemen dar, so ist es aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll, mögliche Synergieeffekte in der Instandhaltung zu untersuchen. Diese ergeben sich z. B. dann, wenn Instandhaltungsmaßnahmen zusammen ausgeführt werden können. Da solche Effekte in Abhängigkeit der Instandhaltungsstrategie unterschiedlich ausfallen können, sind sie bei der Strategiewahl zu betrachten. Eine solche „Blockbildung“ ist vor allem im Schienennetz mit seinen räumlich verteilten Systemen relevant. Hier ist es sinnvoll, mehrere Sicherungssysteme durch ihre räumliche Zusammengehörigkeit als eine Anlage zu betrachten und zu bewerten. Die Verarbeitung in der Simulation (B) ist dementsprechend festzulegen. Bei der gemeinsamen Instandhaltung von bspw. Signal, Weichenantrieb und Achszähler, die sich in einem Blockabschnitt befinden, können mitunter erhebliche Wegezeiten und damit Kosten eingespart werden. Dabei ist jedoch auch zu prüfen, ob die Einsparungen größer sind als der monetäre Wert der nicht genutzten Zustandsreserve (vgl. Abbildung 18). Vor diesem Hintergrund wird der Strategiesimulation eine Optimierung (B) nachgeschaltet. Hierbei gilt es die Strategien der einzelnen Systeme jeweils in einem möglichen Band zu variieren.⁴⁴ Zum Beispiel können bei einer zeitabhängigen Instandhaltung die Fristen i. d. R. in den Grenzen eines Zeitfensters verschoben werden, ohne Sicherheitsrisiken einzugehen. Die Veränderungen in den Instandhaltungskosten und die Auswirkungen auf die Systemverfügbarkeiten sind anhand der Ergebnisgrößen (C) zu erfassen. Diese ermöglichen Strategievergleiche mit denen eine Vorteilhaftigkeitsentscheidung getroffen werden kann. Bevor jedoch eine abschließende Strategiewahl möglich ist, ist in der Regel ein Abgleich mit den verfügbaren Ressourcen [Eng03] und gestellten Mindestanforderungen notwendig (D). Mit dieser Machbarkeitsprüfung kommt man dem zumeist vorherrschenden Umstand beschränkter Ressourcen im Instandhaltungsmanagement und vertraglich zu erfüllender Qualität nach. Gleichfalls können mit dem Bewertungsmodell Strategieanpassungen, die sich bspw. durch zeitliches Verschieben von Instandhaltungsmaßnahmen für weniger kritische Betrachtungseinheiten ([Kel97], S. 147) definieren, einfach bewertet werden.

⁴⁴ So sind Variationen/ Anpassungen bei Art, Umfang oder Zeitpunkt der einzelnen Maßnahmen denkbar.

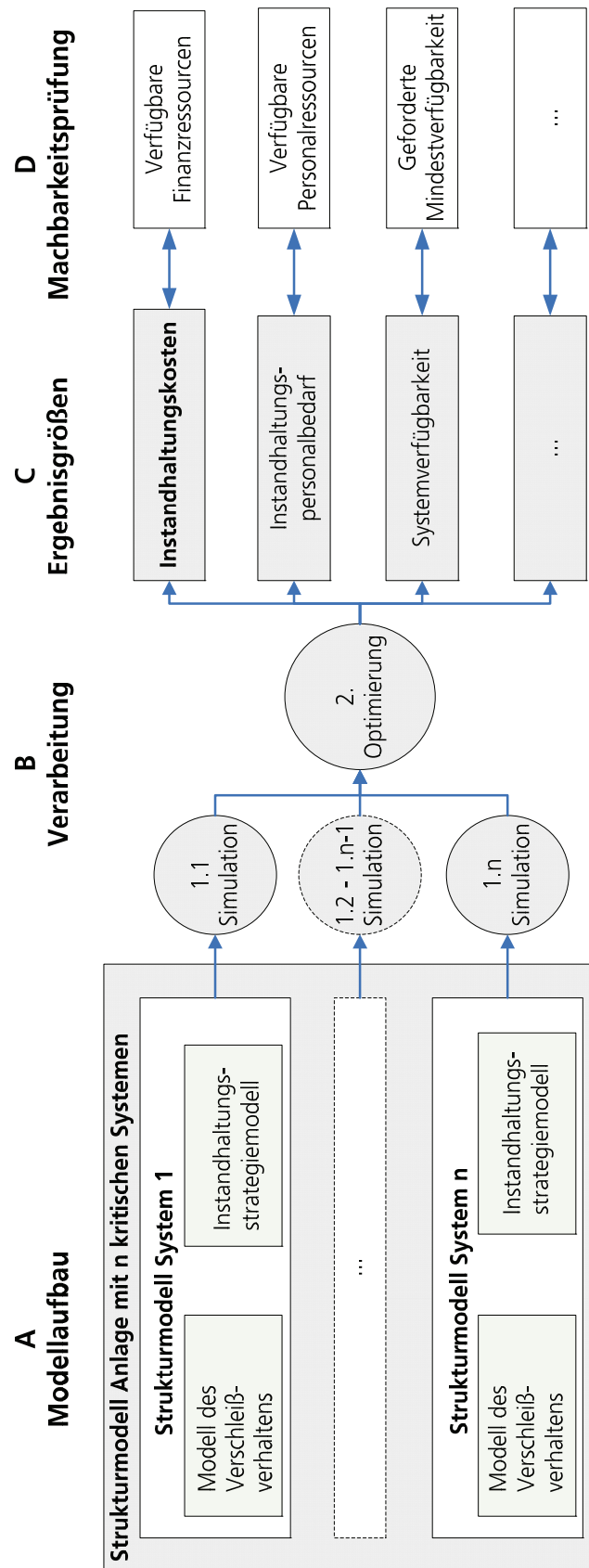


Abbildung 23: Aufbau und Ablauf der Instandhaltungsstrategiemodellierung und -bewertung

Dabei kann mit dem Modell flexibel auf die Fallspezifika reagiert werden. Ist eine solche Anlagenbetrachtung nicht zutreffend, kann sie ausgeklammert und die Instandhaltungsstrategien für ein einzelnes System anhand der definierten Ergebnisgrößen bewertet werden (vgl. Abbildung 21 und Abbildung 22). Der Optimierungsschritt entfällt daraufhin.

Die Ausführungen des Abschnitts 4.7 zeigen die Vorgehensweise bei einer Instandhaltungsstrategiebewertung auf Basis einer Zustandsmodellierung zum Investitionszeitpunkt. Es wird verdeutlicht, welche zwingenden Parameter und Wirkbeziehungen im Bewertungsmodell enthalten sein müssen. Darauf aufbauend ist die Modellstruktur für die Strategiebewertung für ein einzelnes System als auch für eine Anlage bestehend aus mehreren Systemen verbal und grafisch beschrieben. Auf diesen Kenntnissen sowie der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Investitionsstrategiebewertung fußt das im nachfolgenden Kapitel beschriebene Verfahren der integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien für die Bahnsicherungstechnik.

5 Integrierte Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien

5.1 Idee

Die aktuelle Entwicklung auf dem Verkehrsmarkt macht eine genauere Analyse strategischer Entscheidungen im Bereich Schiene hinsichtlich ihres wirtschaftlichen Beitrags unabdingbar. Aus diesem Anspruch heraus wurde ein Verfahren aufgestellt, mit dessen Hilfe es Infrastrukturbetreibern gelingt, nachhaltig unternehmerisch sinnvolle Investitionsentscheidungen treffen zu können, die in ihrer Qualität jene Investitionsempfehlungen resultierend aus etablierten Methoden und Verfahren mitunter erheblich übertreffen.

Derzeit bestehende Verfahren greifen in der Regel zu kurz und nutzen bei Investitionsentscheidungen keine detaillierten Lebenszyklusanalysen. Zwar wird versucht die Gesamtheit der über einen Lebenszyklus mit der Investitionsstrategie verbundenen Kosten zu erfassen. Dabei beschränkt man sich jedoch rein auf die monetär erfassbare Produktionsmittelsicht. [Mül06] Des Weiteren wird der Gestaltungsrahmen, den der Betreiber insbesondere in der Anlagenpflege über die Nutzungsphase hat, nicht differenziert untersucht oder bewertet. Eine hier angestrebte integrierte Untersuchung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien wird zum einen dem Anspruch einer umfassenden, d. h. im Sinne einer Lebenszyklusanalyse, den gesamten Lebenszyklus betrachtenden Bewertung, gerecht. Zum anderen werden die Instandhaltungskosten, die nicht allein durch die Wahl der Produktionsmittel, sondern auch durch das Instandhaltungsmanagement des Betreibers und dessen Instandhaltungsstrategiewahl bestimmt werden, differenziert betrachtet. Diese Analyseergebnisse werden in besonderer Weise bei der Investitionsentscheidung berücksichtigt.

Dass eine solche integrierte Betrachtung zu empfehlen ist und sich nur so das genannte Ziel niedriger LCC und hoher Systemwirtschaftlichkeit erreichen lässt, zeigt eine umfassende Studie [UIC02b]. Darin wird festgehalten, dass viele Kostentreiber sowohl für die Investitionen als auch bei der Instandhaltung Gültigkeit haben. Die gleiche Studie stellt weiter fest, dass zum einen der Anlagenbestand und zum anderen die Instandhaltungsstrategie⁴⁵ die beiden Aspekte darstellen, mit denen sich am stärksten eine Kostensenkungen erreichen lässt. Während eine Ausrichtung des Anlagenbestands an der Verkehrsnachfrage nur im Rahmen der Festlegung der Investitionsstrategie erfolgen kann, ist ein effizientes Instandhaltungsmanagement für die Anlagen der zuvor definierten Investitionsstrategie mit einer passenden Instandhaltungsstrategie möglich. [Sta01] [UIC02b]

⁴⁵ Bestehende Optimierungspotentiale in der Instandhaltung von Bahnsicherungstechnik und damit der Instandhaltungskosten werden im Besonderen aufgrund der derzeit vorrangig rein zeitabhängigen präventiven Instandhaltung der Anlagen vermutet.

Neben der großen Bedeutung der Aspekte Investitions- und Instandhaltungskosten für den Betreiber bahnsicherungstechnischer Anlagen bedingt sich deren integrierte Bewertung demzufolge aus ihrer gegenseitigen Abhängigkeit. So beeinflusst die Wahl der Investitionsstrategie zum einen die denkbaren Instandhaltungsstrategien. Diese wiederum nehmen durch die damit verbundenen Instandhaltungskosten Einfluss auf den Nettobarwert der Investitionsstrategien bei Berücksichtigung der LCC (vgl. Abbildung 2 sowie Abschnitt 3.1.1). Denn wie in Abschnitt 4.4 erläutert, bestimmen die Art und Weise der Instandhaltung den Umfang der systemerhaltenden Maßnahmen und die Verfügbarkeit und damit auch die LCC des Systems mitunter erheblich [DIN05]. Für die Bahnsicherungstechnik gilt dieser Zusammenhang im Besonderen. Deshalb müssen beide Aspekte gemeinsam optimiert werden. Nur durch eine integrative Bewertung beider Aspekte kann vermieden werden, dass eine Investitionsalternative ausgewählt wird, die bspw. aufgrund kostenintensiver Instandhaltung zwar jene mit den geringsten Anschaffungsausgaben, aber nicht jene mit den niedrigsten LCC ist. Abbildung 24 verdeutlicht den Zusammenhang.

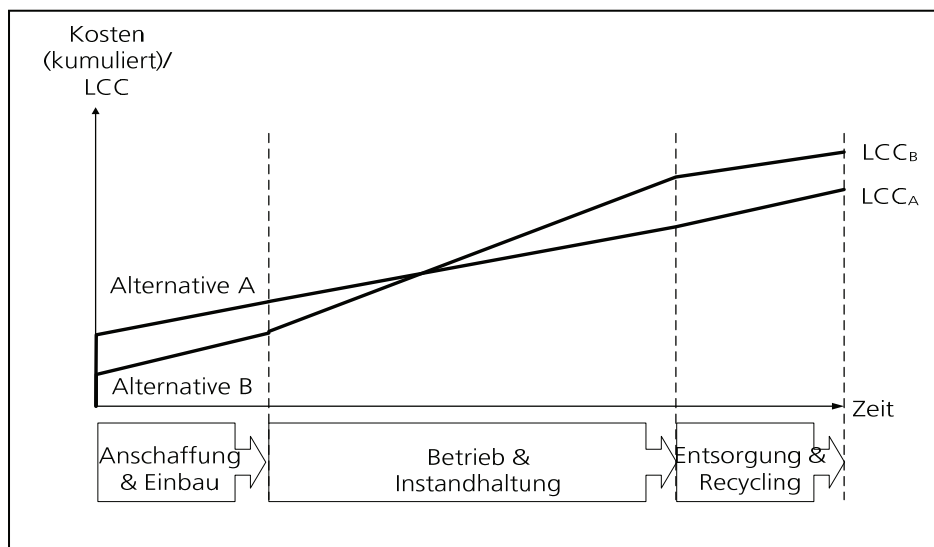


Abbildung 24: Anschaffungsausgaben versus Betreiber-LCC

Schematisch sind hier zwei verschiedene Investitionsalternativen in ihrem Kostenverlauf dargestellt. Darin wird ersichtlich, dass Alternative A zum Zeitpunkt der Anschaffung aufgrund höherer Entwicklungsaufwendungen teurer ist als Alternative B. Alternative B ist jedoch sowohl hinsichtlich Einbau als auch Betrieb und Instandhaltung kostspieliger. Dies führt dazu, dass am Ende der Nutzungsdauer Anlage A niedrigere kumulierte Kosten (LCC) verursacht hat als Anlage B über einen vergleichbaren Zeitraum. Weil sich dieses Verhältnis auch nicht mehr durch die Entsorgungskosten verschiebt, gilt, dass Anlage A – gleiche Lebensdauer und Leistungsfähigkeit vorausgesetzt – für den Anlagenbetreiber wirtschaftlich attraktiver ist als Anlage B ($LCC_B > LCC_A$).

Eine analog zu der Instandhaltungsstrategiebewertung gesonderte Bewertung von Betriebs- und Entsorgungsstrategien ist für Investitionen in die Bahnsicherungstechnik in der Regel nicht notwendig. Die Betriebsstrategie ist mit der Wahl der Produktionsmittel weitestgehend festgeschrieben. Zudem haben alle Investitionsalternativen zumeist den gleichen Einsatzzweck

und damit die gleichen Betriebsbedingungen. Eine gesonderte Betrachtung der Entsorgungskosten entfällt aufgrund ihrer geringen wirtschaftlichen Bedeutung und hohen Informationsunsicherheit, verursacht durch ihr spätes zeitliches Eintreten (vgl. Gleichung [1], Abschnitt 3.1.3). Eine Erfassung der Betriebs- und Entsorgungskosten im Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstrument in Abhängigkeit der Streckenausstattungsspezifika ist deshalb ausreichend.

Zum besseren Verständnis ist die Idee in Abbildung 25 dargestellt.

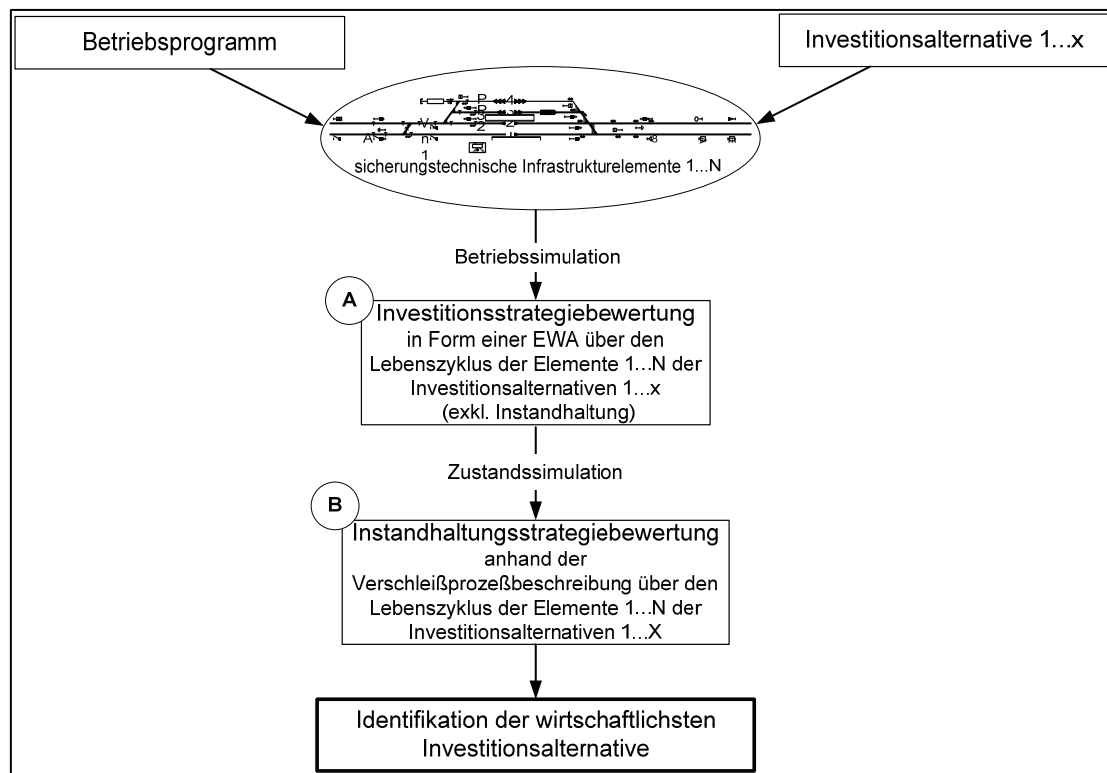


Abbildung 25: Integrierte Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien

Abbildung 25 verdeutlicht, dass für die auszurüstende Infrastruktur mit gegebenen Betriebsprogramm (A) Investitionsalternativen zu identifizieren und mittels Betriebssimulation und Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstrument detailliert zu analysieren sind (Kapitel 3). Dies geschieht exklusive einer Bewertung von Instandhaltungsalternativen. Mit Bewertungsschritt (B) erfolgt die separate Untersuchung der für die relevante(n) Investitionsalternativen 1...X in Frage kommenden Instandhaltungsstrategien anhand der Schädigungsprozessbeschreibung der einzelnen Infrastrukturelemente (Kapitel 4). Die Ergebnisse aus den beiden Bewertungsschritten (A) und (B) fließen abschließend zusammen, um eine Investitionsentscheidungsempfehlung geben zu können. Diese stellt für den gegebenen Untersuchungsraum mit Betriebsprogramm die wirtschaftlichste Alternative dar. An folgendem Beispiel sei der Nutzen dieser Idee verdeutlicht. Mittels des neuen Verfahrens wird für einen Untersuchungsraum mit einer geplanten Nutzungsdauer von 20 Jahren eine Investitionsalternative selektiert, mit der durch eine günstigere Kombination aus Investitions- und Instandhaltungskosten jährliche Einsparun-

gen an Instandhaltungskosten von 5.000 GE bei lediglich 30.000 GE höheren Investitionsausgaben erzielt werden. Für das Unternehmen bedeutet dies, dass über die gesamte Nutzungsdauer Gelder in Höhe von 70.000 GE (ohne Abdiskontierung) effizienter eingesetzt werden können.

5.2 Thesen

Die Idee lässt sich mit folgenden drei Thesen treffend zusammenfassen. Sie verdeutlichen die Motivation für die Umsetzung der integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien.

1. These

Die aus Betriebssimulationen gewonnenen betrieblichen Erkenntnisse liefern wichtige Informationen bezüglich der Qualität und damit der Wettbewerbsfähigkeit des Verkehrsträgers Schiene. Entsprechend sind sie für eine umsichtige Investitionsentscheidung unverzichtbar.

2. These

Die Notwendigkeit für Instandhaltungsmaßnahmen an einer Anlage entspringt aus ihrer Zustandsverschlechterung. Entsprechend ist für eine aussagekräftige Instandhaltungsstrategiebewertung anhand der verursachten Kosten und erreichten Verfügbarkeit die Zustandsbeschreibung unabdingbar.

3. These

Die Zusammenhänge zwischen verbauter Sicherungstechnik, Streckenbetrieb und Wirtschaftlichkeit sind vielschichtig und langfristiger Natur. Entsprechend ist eine integrative, lebenszyklusübergreifende Bewertung von Alternativen für Investitionen in Eisenbahnsicherungstechnik zwingend notwendig.

An den drei Thesen soll anhand der in Kapitel 6 durchgeführten Fallstudie die Wirksamkeit des Verfahrens gemessen werden. Zuvor verschafft Abschnitt 5.3 einen Überblick über die notwendigen Arbeitsschritte für eine integrierte Bewertung.

5.3 Vorgehensweise

Das Verfahren beruht auf zwei wesentlichen Säulen. Erstens erfolgt die Auswahl einer Investitionsstrategie auf Basis ihrer LCC- und Nutzenwerte unter Verwendung von Informationen aus Eisenbahnbetriebssimulationen. Für die Zusammenstellung und Auswertung der strategieabhängigen Kosten- und Nutzenwerte wird ein Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstrument genutzt, das mit den Ausgabedaten der Eisenbahnbetriebssimulation verbunden ist (vgl. Kapitel 3). Die zweite Säule bildet die Bewertung von alternativen Instandhaltungsstrategien für

die im ersten Schritt identifizierte Investitionsstrategie anhand ihrer Instandhaltungskosten (vgl. Kapitel 4). Das damit erreichte Ziel ist eine Investitionsentscheidung für Bahnsicherungstechnik, die unter Berücksichtigung einer externen (Produktionsmittelalternativen der Hersteller) wie internen (Anlageninstandhaltung) Sicht die wirtschaftlichste Alternative bildet. Dies schafft einen wichtigen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit des Systems Schiene.

Das nachfolgend dargestellte Ablaufdiagramm (siehe Abbildung 26) verschafft einen Überblick über die Bausteine einer integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien. Zur Anwendung des Bewertungs- und Selektionsverfahrens sind folgende drei grundlegende Arbeitsschritte auszuführen.

1. Erfassung aller relevanten Rahmenbedingungen, Vorgaben und Ressourcenbeschränkungen. Dabei ist zu beachten, dass diese zeitlichen Veränderungen über den die Bewertung umfassenden Zeitraum unterliegen können.
2. Identifikation und Simulation möglicher Investitionsstrategien und Selektion der wirtschaftlichsten Alternative mittels Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstrument; wobei diese Selektion im ersten Schritt ohne Berücksichtigung der Instandhaltungskosten erfolgt.
3. Bestimmung und Modellierung der für die zuvor identifizierte Investitionsstrategie denkbaren Instandhaltungsstrategien und abschließende Strategieselection mit der Prämisse niedrigster Instandhaltungskosten.

Mit dieser Vorgehensweise ist jene Investitionsstrategie mit zugehöriger Instandhaltungsstrategie gefunden, die den höchsten Beitrag zur Wirtschaftlichkeit des Systems Schiene liefert, also die günstigste Kombination von Systemnutzen und Betreiber-LCC unter geltenden betrieblichen und unternehmerischen Vorgaben darstellt.

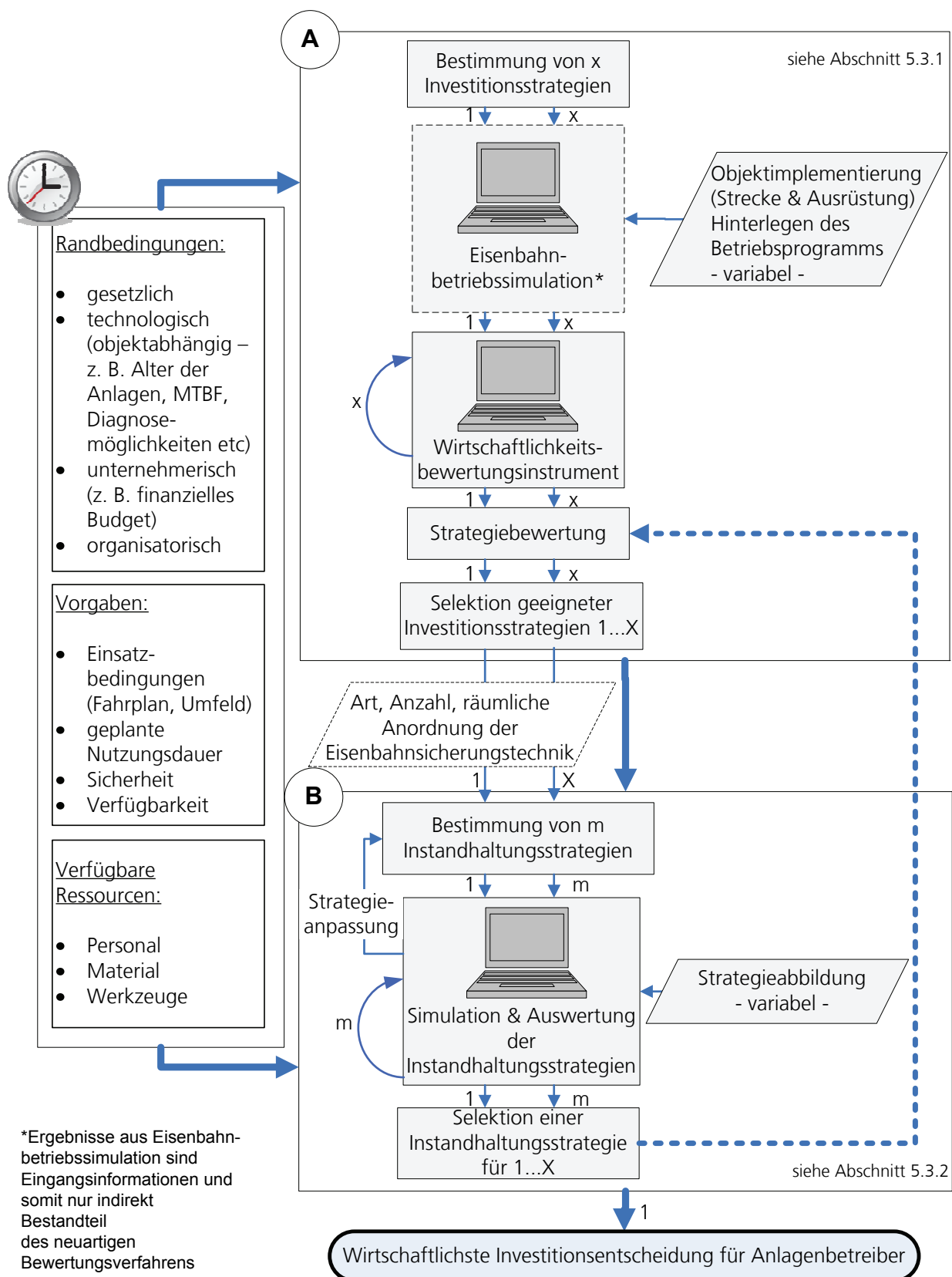


Abbildung 26: Ablaufdiagramm für die integrierte Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien

Zunächst sind für die Identifikation möglicher Investitions- und Instandhaltungsstrategien die geltenden gesetzlichen, betrieblichen wie unternehmerischen Rahmenbedingungen zu erfassen. Zu ihnen zählen im Besonderen die geltenden Qualitätsvorgaben für die betrachtete Eisenbahnstrecke und die einsetzbaren Infrastrukturelemente, die von Unternehmensseite verfügbaren Ressourcen und generell am Markt erhältlichen technischen Lösungen (vgl. [VDI05]). Dabei sind insbesondere die Vorgaben bzw. Beschränkungen von Seiten des Streckenabschnitts und des Betreibers mit Blick auf zukünftige Entwicklungen zu analysieren (z. B. Änderungen in der Verkehrsnachfrage oder dem zur Verfügung stehenden Budget). Zu erwartende Änderungen innerhalb des Bewertungszeitraums sind festzuhalten damit sie entsprechend in der Modellierung und Strategiebewertung Berücksichtigung finden (siehe hierzu Sensitivitätsanalysen in Abschnitt 3.1.1.2). Veränderungen hinsichtlich der Randbedingungen, Vorgaben und verfügbaren Ressourcen sind insbesondere aufgrund des langen Zeithorizonts ($T \geq 20a$) bei der Bewertung von Bahnsicherungsanlagen zu erwarten.

Ausgehend von diesem Informationsgerüst sind die möglichen Investitionsstrategien zu bestimmen. Diese sind in dem vorbereiteten Simulationsumfeld (Objektimplementierung und Betriebsprogrammfestlegung) mittels Eisenbahnbetriebssimulation hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Betriebsqualität sowie den zu erwartenden Lebenszykluskosten zu bewerten. Dabei findet das neu aufgestellte Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstrument (vgl. Abschnitt 3.2) Verwendung, mit dessen Hilfe die Simulationsdaten in geeigneter Weise, d. h. umfassend und übersichtlich, verarbeitet werden. Das Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstrument fasst die Simulationsergebnisse in Kennzahlen zusammen, die zu einer ersten Auswahl der wirtschaftlich attraktivsten Investitionsstrategien 1...X benötigt werden.

Mit einer ersten Investitionsstrategieauswahl und der Kenntnis der gesetzlichen wie unternehmerischen Vorgaben sowie den verfügbaren Ressourcen sind die wesentlichen Randparameter für die sich anschließende Definition möglicher Instandhaltungsstrategien festgelegt. Mit den Investitionsalternativen sind die Art, Anzahl und räumliche Anordnung sowie technische Beschaffenheit (Alter, Zuverlässigkeit etc.) der verbauten Infrastrukturelemente bekannt. Die definierten Instandhaltungsstrategien (vgl. Abschnitt 4.4) werden in der Modellierungsumgebung hinterlegt und hinsichtlich der Zielfunktion (i. d. R. niedrigste Kosten) analysiert. Im Rahmen der Strategieanalyse erfolgen Optimierungsbetrachtungen, die mitunter zu Anpassungen in den Instandhaltungsstrategien führen (vgl. Abschnitt 4.7). Das Ergebnis von Modellierung, Analyse und Bewertung ist die Bestimmung einer zu den Investitionsstrategien unter wirtschaftlichem Gesichtspunkt jeweils optimal passenden Instandhaltungsstrategie. Dabei muss der Schritt der Instandhaltungsstrategiebewertung und -selektion mehrfach, d. h. für mehrere Investitionsstrategien ausgeführt werden wenn $X > 1$. Dieser Fall tritt dann ein, wenn zwei oder mehr mögliche Investitionsstrategien mit ähnlichem Kosten-Nutzen-Verhältnis identifiziert werden. Dann ist zu prüfen, welche der Investitionsstrategie(n) mit ggf. geringfügig höheren LCC und/ oder niedrigerem Nutzen durch eventuell kostengünstigere Alternativen in der Instandhaltung im Gesamtergebnis am wirtschaftlich attraktivsten ist.

Im Ergebnis ist ein Paket aus Investitions- und Instandhaltungsstrategie für den Streckenabschnitt mit höchster wirtschaftlicher Effizienz durch niedrige Lebenszykluskosten und bestmöglicher betrieblicher Qualität definiert.

Daneben hat der Betreiber detaillierte Kenntnisse über Höhe und Zeitpunkt der zu erwartenden Kosten. Für das Instandhaltungsmanagement liefert die Bewertungsmethodik ein tiefgehendes Verständnis vom Ursache-Wirkungsgefüge zwischen Zustand, Maßnahmen und Kosten. Das Verfahren der integrierten Bewertung von Investition und Instandhaltung schafft ein umfassendes Wissen, welches auch noch nach der eigentlichen Entscheidung genutzt werden kann, bspw. bei Strategieanpassungen in der Instandhaltung oder bei Entscheidungen zu ähnlichen Investitionsprojekten.

Die Unterschiede in dieser Vorgehensweise zu bestehenden Bewertungsansätzen für Investitionsentscheidungen in Eisenbahninfrastruktur lassen sich wie folgt zusammenfassen.

1. Investitions- und Instandhaltungsalternativen werden integrativ betrachtet, wobei die Instandhaltungsstrategien einer gesonderten Analyse unterzogen werden.
2. Ergebnisse aus Eisenbahnbetriebssimulationen fließen in eine LCC/ Nutzen-Analyse der Investitionsalternativen ein.
3. Die möglichen Instandhaltungsstrategien werden mit Hilfe der Zustandsmodellierung bewertet.

Dabei wird auf die Möglichkeiten moderner Rechentechnik zurückgegriffen (vgl. Abbildung 26). Diese Notwendigkeit ergibt sich aus der Mehrdimensionalität des Entscheidungsproblems, in dem unterschiedliche Systemparameter, Randbedingungen und Abhängigkeiten berücksichtigt werden müssen. Nur mit Hilfe des Einsatzes von Computern wird die Komplexität beherrschbar und damit eine strukturierte und umfassende Entscheidungsfindung möglich (vgl. Anhang B).

Im Folgenden ist das Vorgehen für die integrierte Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien detaillierter beschrieben (vgl. Abschnitte 5.3.1 und 5.3.2). Die Ausführungen in den Kapiteln 3 und 4 sind hierfür wesentlich.

5.3.1 Investitionsstrategiebewertung

Dieser Abschnitt liefert einen detaillierten Einblick in die notwendigen Arbeitsschritte der Investitionsstrategiebewertung. Nachfolgende Abbildung 27 zeigt den prinzipiellen Ablauf für eine simulationsunterstützte Bewertung von Investitionsstrategien in Bahnsicherungstechnik [BSJ07].

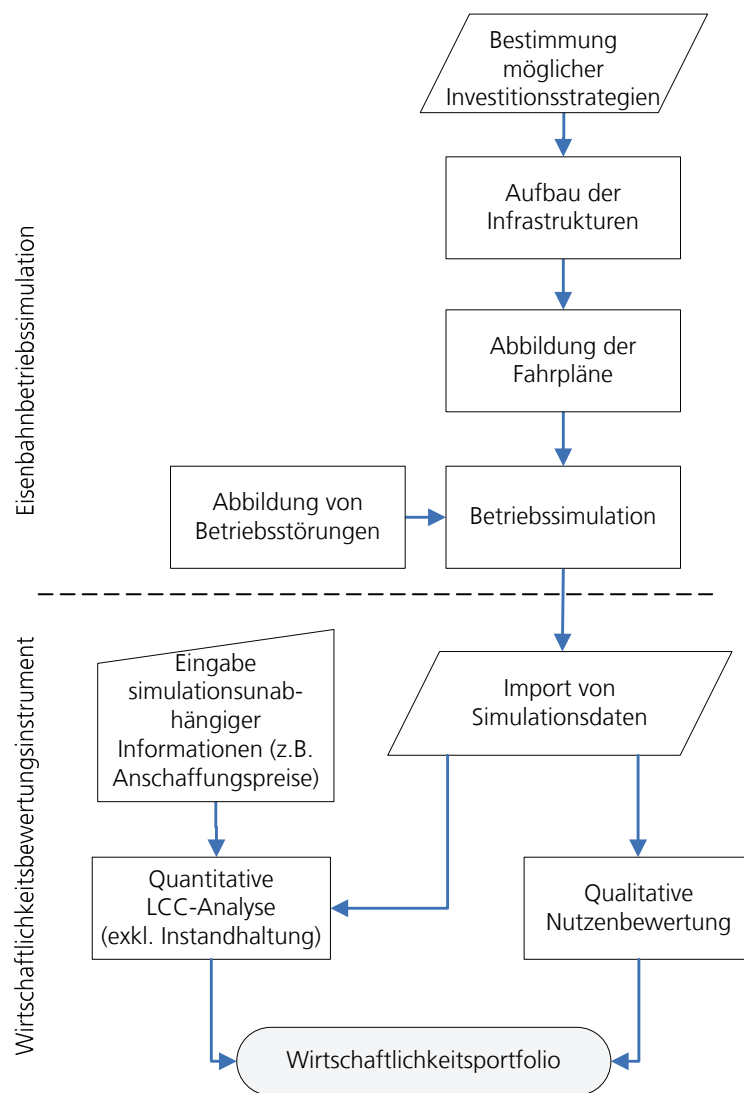


Abbildung 27: Ablauf Bewertung Investitionsstrategien

Zunächst gilt es all jene Investitionsstrategien zu bestimmen, die unter Berücksichtigung der definierten Einsatz- und Randbedingungen in Frage kommen. Hierfür gibt es kein standardisiertes Verfahren. Wohl aber kann die Richtlinie 752 vom VDV als Orientierungshilfe eingesetzt werden [VDV04]. Für eine detaillierte Streckenprojektierung sind umfassendes betriebliches Wissen und langjährige Erfahrung gefragt.

Nach der Bestimmung der zu bewertenden Investitionsstrategien sind diese mit ihrer Infrastruktur und Fahrplan in der Betriebssimulationsumgebung zu hinterlegen. Darauf aufbauend erfolgt die Durchführung von einzelnen Simulationsläufen. Dies ermöglicht zum einen die Analyse des Bahnbetriebs bei der gewählten Investitionsstrategie unter normalem, d. h. störungsfreiem Betrieb. Zum anderen kann die Qualität der Ausrüstungsvariante im Falle von Betriebsstörungen untersucht werden. Hierzu werden für alle Investitionsstrategien einheitliche Störszenarien definiert. Die Betriebssimulation liefert im Ergebnis umfassende Informatio-

nen, die zur qualitativen und quantitativen Bewertung der Investitionsstrategien benötigt werden.

Aus der Fülle der aus den Simulationsläufen gewonnenen Informationen werden die für die Strategiebewertung relevanten Informationen in das Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstrument überführt (vgl. 3.2.3). Dabei werden die importierten Daten unterschieden, je nachdem, ob sie für die monetäre Bewertung oder die qualitative Nutzenbewertung verwendet werden. Daneben sind für eine Aussage zur Wirtschaftlichkeit der einzelnen Investitionsstrategien zusätzliche Informationen notwendig, die nicht mittels Simulation ermittelt werden können bzw. dafür nicht relevant sind. Dazu zählen bspw. die Anschaffungspreise der Infrastrukturelemente oder die Kosten einer Betriebspersonalstunde. Mit Hilfe des Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstruments werden alle relevanten Informationen zusammengeführt, entsprechend den Vorgaben verarbeitet und ein Wirtschaftlichkeitsportfolio erstellt. (vgl. Abschnitt 3.1.1) Im Portfolio werden die untersuchten Investitionsstrategien hinsichtlich Kosten-Nutzen-Wirksamkeit gemeinschaftlich dargestellt. Dies erlaubt die Bestimmung der wirtschaftlich sinnvollsten Investitionsstrategien, also jener Strategien 1...X für die im nachfolgenden Schritt die Instandhaltungsstrategien zu definieren und zu bewerten sind (vgl. Abbildung 26).

5.3.2 Instandhaltungsstrategiebewertung

Für die Definition von für die einzelnen Investitionsstrategien geeigneten Instandhaltungsstrategien kommt die in Abbildung 20 (siehe Abschnitt 4.5) dargestellte systematische Entscheidungsabfolge zum Einsatz. Deren Anwendung setzt neben einer genauen Systemkenntnis das Wissen über vorhandene Diagnosemöglichkeiten voraus. Der Einsatz von Diagnoseinstrumenten und damit verbunden die Potentiale für eine zustandsorientierte Instandhaltung sind analog zu den übrigen Basisstrategien zum Zeitpunkt der Instandhaltungsstrategiedefinition mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit der Instandhaltung kritisch zu hinterfragen. Dies erfolgt im Rahmen der Instandhaltungsstrategiemodellierung und -simulation. Dieser nun folgende Arbeitsschritt ist im Detail in Abbildung 28 dargestellt. Anhang B verdeutlicht im Rahmen einer Komplexitätsberechnung den dafür notwendigen Einsatz von Simulation.⁴⁶

⁴⁶ Nicht allein die durch die Größe des Lösungsraums bedingte Komplexität der Strategiebewertung empfiehlt sich der Einsatz von Rechentechnik. Auch sichert dies eine zuverlässigere und exaktere Berechnung. So gilt zum einen, dass die Zuverlässigkeit eines technischen Systems höher als die menschliche ist. Zum anderen berechnet die Simulation 100 Werte je Zeitschritt, ist damit wesentlich genauer als eine manuelle Berechnung.

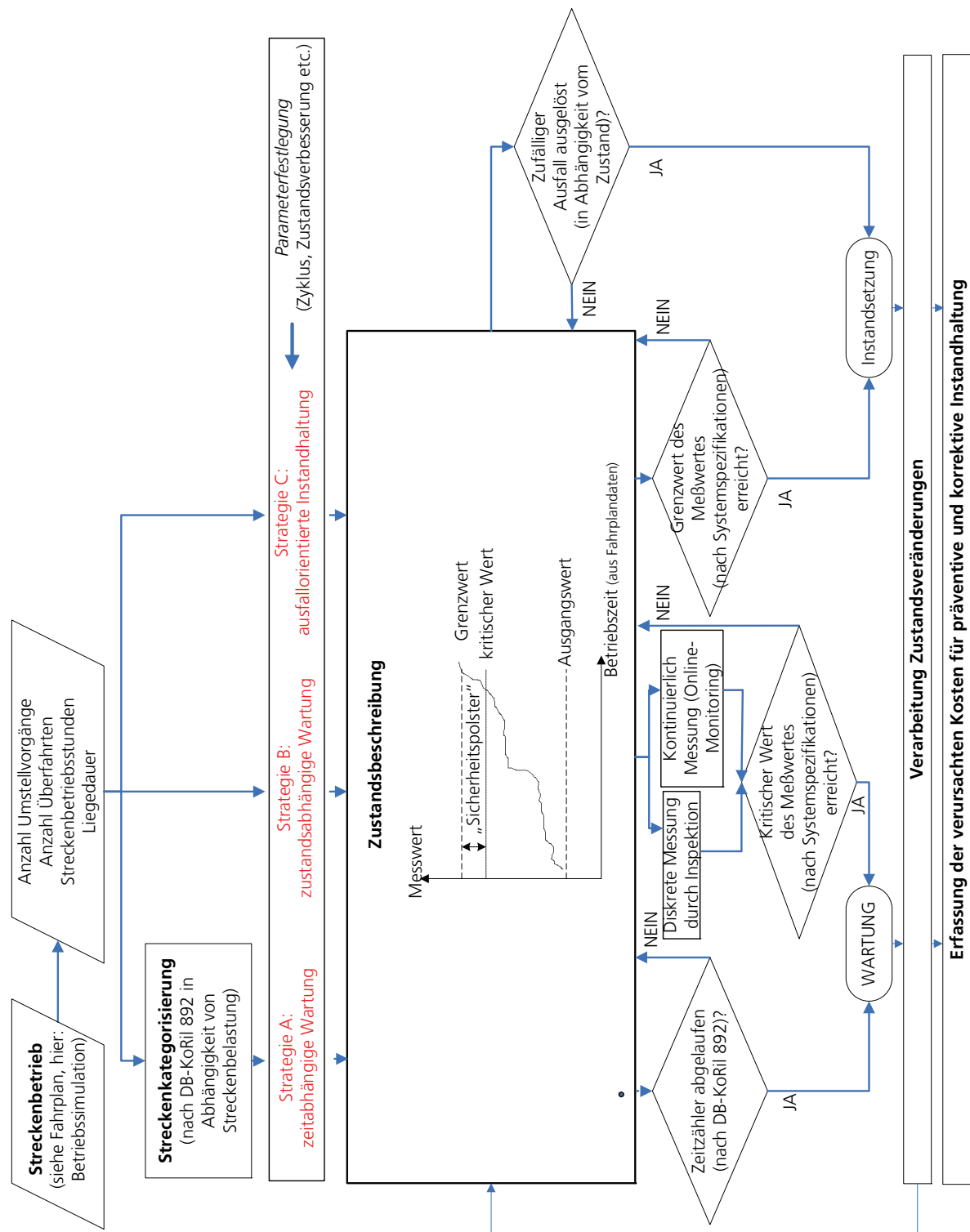


Abbildung 28: Simulationsablauf bei der Bewertung von Instandhaltungsstrategien auf Systemebene

Abbildung 28 macht deutlich, dass der Kern der Instandhaltungsstrategiemodellierung die kontinuierliche Simulation (Berechnung) des Systemzustands ist. Dieser ist zum einen abhängig von dem betrachteten Objekt und dessen Anfangsqualität sowie den zutreffenden technikspezifischen Schädigungsmechanismen (vgl. Abschnitt 4.2). Zum anderen bedingt er sich durch die Umfeld- und Umwelteinflüsse wie bspw. die Liegedauer, Temperatur und Luftfeuchtigkeit oder Anzahl der Umstellvorgänge. Die Umfeldinformationen können zum Teil aus den Eisenbahnbetriebssimulationen gewonnen werden; bspw. gilt dies für die Anzahl der Umstellvorgänge oder für die Betriebsdauer (vgl. Abbildung 28). Relevante Informationen zu Umwelteinflüssen wie bspw. Temperatur und Luftfeuchtigkeit sind unabhängig von den zuvor durchgeführten Eisenbahnbetriebssimulationen in die Strategiemodellierung aufzunehmen. Daneben existieren mitunter Vorgaben von Unternehmensseite. Für die Instandhaltung der Infrastruktur der DB Netz AG gilt bspw. die Konzernrichtlinie 892 [DB06b]. Mit ihr ist die zeitbasierte Instandhaltung der Infrastrukturelemente entsprechend der Streckenkategorisierung geregelt. Mit der Kenntnis der systeminternen und -externen Einflussgrößen auf den Zustand der Betrachtungseinheit ist eine Zustandsberechnung im Bewertungsmodell möglich. Der von ADAM beschriebene Tatbestand, dass sich der zustandsbeschreibende Messwert stets beanspruchungs- und/ oder zeitabhängig verschlechtert ([Ada89], S. 38), wird mit fortschreitender Simulationszeit nachgebildet. Dabei werden für die simulationsbasierte Zustandsbeschreibung Kenntnisse aus historischen Daten oder Testläufen (vgl. Abschnitte 4.7.3 und 6.3) verwendet. Daneben ermöglicht die Strategiemodellierung eine differenzierte Abbildung des Anfangswerts des relevanten Zustandsparameters (vgl. Abbildung 14). Der kann mitunter schlechter als der Neuzustand sein. Dies gilt bspw. dann, wenn die Betrachtungseinheit bereits ein gewisses Betriebsalter und damit eine Schädigung aufweist.

Aufbauend auf der Zustandsbeschreibung und den in Abhängigkeit der Instandhaltungsstrategie (vgl. Abschnitt 4.4) hinterlegten Parametern (z.B. Zyklen, Maßnahmendauer) werden simulativ diskrete Instandhaltungsmaßnahmen (Wartung und Instandsetzung) ausgelöst. Ob und welche Art der Instandhaltung notwendig ist und welche Instandhaltungskosten dabei anfallen, wird kontinuierlich in der Simulation unter Abgleich des Zeitzählers mit der Simulationszeit (zeitabhängige Instandhaltung) oder des Zustandsparameters mit dem hinterlegten Grenzwert (zeit-, zustands- bzw. ausfallorientierte Instandhaltung) abgefragt. Die Einflüsse der Instandhaltungsmaßnahmen auf den Zustand werden beschrieben und Instandhaltungs- und Ausfallkosten generiert. Dabei berechnen sich die Kosten bei einer Instandhaltungsmaßnahme entsprechend der unten dargestellten Gleichung [9] (vgl. Abschnitt 4.3)⁴⁷. Die Instandhaltungskosten K_{IH} bilden das Strategieselektionskriterium und werden für die einzelnen, mit der Investitionsstrategie verbundenen Sicherungssysteme über den gesamten Simulationszeitraum aufsummiert.

⁴⁷ Overheadkosten wie bspw. Kosten für Einsatzplanung etc. werden nicht berücksichtigt. Hier erfolgt eine Bewertung der Instandhaltung i. e. S. (vgl. Abschnitt 4.4).

$$K_{IH} = K_{fix} + \text{Materialkosten} + (\text{Anzahl Personal} \times \text{Einsatzdauer} \times \text{Personalstundensatz}) + K_{ind} \quad [9]$$

mit

K_{fix} - fixe Kosten, d. h. vom Umfang der Instandhaltungsmaßnahme unabhängige Kosten, z. B. Wegekosten

K_{ind} - indirekte Instandhaltungskosten

Der Zusammenhang der Größen Instandhaltungsmaßnahme, Zustand und Kosten beschreibt sich über den Abnutzungsvorrat (vgl. Abbildung 22, Abschnitt 4.7.3). Parallel zur reinen Kostenbewertung ermöglicht das Modell einen Abgleich von verfügbaren mit benötigten Ressourcen (vgl. Abbildung 23).

Für die Grundstrategien der zeitabhängigen, zustandsorientierten und ausfallorientierten Instandhaltung wird das Simulations- und Bewertungsverfahren nachfolgend kurz verbal beschrieben. Mit dem Fallbeispiel in Kapitel 6 werden diese Inhalte veranschaulicht.

Zeitabhängige Instandhaltung

Bei der zeitabhängigen Instandhaltungsstrategie (Strategie A, vgl. Abbildung 28) erfolgt die präventive Instandhaltung zunächst unabhängig von dem eigentlichen Systemzustand, sondern ausschließlich auf Basis des Wartungszyklus. Im Modell wird deshalb kontinuierlich abgefragt, wie viel Zeit seit der letzten Wartung vergangen ist. Ein Abgleich mit dem hinterlegten Wartungsintervall nach KoRil 892 führt bei Übereinstimmung zu einer Wartungsmaßnahme. Dauer sowie notwendiges Personal und Material sind im Modell festgeschrieben. Danach berechnen sich die präventiven Instandhaltungskosten. Nach Abschluss der Wartung verbessert sich der Zustand um den im Modell hinterlegten Wert. Dieser Wert lässt sich mittels Messreihenanalysen (bspw. aus Diagnosesystemen) gewinnen. Neben den präventiven Instandhaltungsmaßnahmen, können bei zu schlechtem Systemzustand Ausfälle auftreten. Diese können mangels eines Diagnosesystems bzw. zeitlich starren Wartungsmaßnahmen nicht rechtzeitig aufgedeckt werden. In diesem Falle treten Betriebserschwerungskosten sowie die mit der Entstörung verbundenen direkten Instandhaltungskosten auf. Im Gegenzug wird der Systemzustand verbessert. Die dazu notwendigen Größen sind im Modell ebenso zu hinterlegen. Zusätzlich können zufällige Ausfälle auftreten. Diese Ausfälle bedingen sich primär durch externe Faktoren (z.B. starker Niederschlag). Ob diese Faktoren tatsächlich einen Ausfall des Systems verursachen, hängt wiederum vom Systemzustand ab.⁴⁸ Entsprechend ist dieser bei der Modellierung der Eintrittswahrscheinlichkeit zufälliger Ausfälle zu berücksichtigen. Mit dem Ereignis der zufälligen Ausfälle werden die in der Praxis regelmäßig auftretenden, unvorhersehbaren Betriebsstörungen (z. B. durch Unwetter, Sabotage) abgebildet. Diese treten unabhängig von der gewählten Instandhaltungsstrategie auf. Zufällige Ausfälle werden im Modell mittels normalverteilter Zufallszahlen generiert. Tritt ein Ausfallereignis auf, so erzeugt dieses entsprechende, im Modell hinterlegte Instandsetzungskosten sowie Opportunitätskosten (in-

⁴⁸ Die Praxis zeigt, dass der Einfluss von unvorhersehbaren Ereignissen (z.B. Unwetter) auf die Systemverfügbarkeit von Systemen mit schlechterem Zustand tendenziell größer ist. [Gut08]

direkte Instandhaltungskosten). Die Höhe der Opportunitätskosten richtet sich nach der Dauer des Ausfalls.

Um eine verlässliche Aussage über den zu erwartenden Einfluss von nicht vorhersehbaren und damit unvermeidbaren, zufälligen Ausfällen zu erhalten, müssen mehrere Simulationsläufe mit gleichen Parametereinstellungen angestoßen werden. Wie wahrheitsgetreu die Aussage ist, hängt von der Wahl des Konfidenzintervalls (siehe Gleichung [11]⁴⁹) ab. Dabei gilt, dass je kleiner das Konfidenzintervall, desto präziser ist die Lageschätzung des wahren Wertes μ^* . Erreicht wird eine Steigerung des Wahrheitsgehalts durch eine möglichst große Anzahl an Simulationsläufen (Stichproben).

$$\bar{x} - t_{(1-\frac{\alpha}{2}, n-1)} \times \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu^* \leq \bar{x} + t_{(1-\frac{\alpha}{2}, n-1)} \times \frac{s}{\sqrt{n}} \quad [10]$$

$$|\bar{x} - \mu^*| \leq t_{(1-\frac{\alpha}{2}, n-1)} \times \frac{s}{\sqrt{n}} \quad [11]$$

Aus Formel [11] lässt sich der Mindeststichprobenumfang n_{\min} ableiten (siehe Formel [12]). Er wird im Wesentlichen durch die Wahl der Irrtumswahrscheinlichkeit α , der Stichprobenvarianz s^2 und der Länge des Konfidenzintervalls L bestimmt. Sie sind bei der Strategiebewertung sinnvoll festzulegen.

$$n_{\min} = \left(\frac{2 \times t_{(1-\frac{\alpha}{2}, n-1)} \times s}{L} \right)^2 \quad [12]$$

mit

$$L = 2 \times t_{(1-\frac{\alpha}{2}, n-1)} \times \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Zustandsabhängige Instandhaltung

Während bei der Beschreibung der zeitabhängigen Instandhaltungsstrategie konsequenter Weise die Zeit eine entscheidende Größe bei der Auslösung vorbeugender Instandhaltungsmaßnahmen bildet, beruht die zustandsabhängige Instandhaltung (Strategie B, vgl. Abbildung 28) ausschließlich auf der Zustandserfassung. Ein Abgleich des Zustands mit den hinterlegten,

⁴⁹ Mit dieser Gleichung lässt sich das Konfidenzintervall für ein normalverteiltes Merkmal mit unbekannter Varianz bestimmen.

systemabhängigen kritischen Werten führt bei Übereinstimmung zu einer Wartungsmaßnahme. Die genaue Übereinstimmung kann jedoch in der Regel nur durch eine kontinuierliche Zustandsabfrage erfolgen. Für die Praxis bedeutet dies den Einsatz von Diagnoseeinrichtungen (ONLINE-Monitoring). Entsprechend muss die in Gleichung [9] aufgeführte Kostenberechnung um die einmaligen Ausgaben für die Diagnosetechnik erweitert werden. Sind solche automatischen Überwachungsanlagen aus technologischen oder betriebswirtschaftlichen Gründen nicht vorhanden, kann eine Zustandsabfrage diskret im Rahmen von wiederkehrenden Inspektionsmaßnahmen erfolgen (vgl. Abschnitt 4.4.2). In der Mehrzahl der Fälle wird der Grenzwert nicht exakt zum Zeitpunkt der Inspektion erreicht bzw. das Inspektionsergebnis wird rein visuell bestimmt und ist damit nicht genau bezifferbar. In diesen Fällen muss der Instandhalter in Abhängigkeit vom Inspektionsergebnis entscheiden, ob eine Instandhaltungsmaßnahme sofort ausgelöst wird oder der Zustand noch gut genug ist und das Ergebnis der nächsten Inspektion abgewartet werden kann. Im Modell erfolgt dies durch einen Abgleich zwischen aktuellem Zustand und dem im Modell hinterlegten Grenzwertbereich. Liegt der aktuelle Zustand innerhalb dieses Bereichs wird eine Instandhaltungsmaßnahme ausgelöst und die dazugehörigen Instandhaltungskosten sowie Zustandsverbesserung generiert. Analog zur zeitabhängigen Instandhaltungsstrategie treten parallel zu den präventiven Instandhaltungsmaßnahmen zufällige Ausfallereignisse auf. Die Abbildung in der Simulationsumgebung erfolgt hierbei analog zum Vorgehen bei der Modellierung der zeitabhängigen Instandhaltung.

Ausfallorientierte Instandhaltung

Mitunter kann auch eine ausfallorientierte Instandhaltung (sogenannte „Feuerwehrstrategie“) (Strategie C, vgl. Abbildung 28) für sicherungstechnische Anlagen in Betracht gezogen werden. Wobei dies eher die Ausnahme sein wird. Dessen ungeachtet wird sie als dritte Grundstrategie an dieser Stelle genannt. Da bei dieser Art der Instandhaltung vollständig auf vorbeugende Maßnahmen verzichtet wird, erfolgen Instandhaltungsmaßnahmen ausschließlich bei Systemausfall. Dies tritt zum einen bei Erreichen des Grenzwertes (vgl. Abbildung 28) als auch, wie bei den beiden zuvor beschriebenen Strategien, zufällig in Abhängigkeit von externen Faktoren und Systemzustand ein. Bei beiden Ausfallereignissen fallen neben den direkten Instandhaltungskosten auch die mit einer Betriebsstörung verbundenen Stillstands- und Opportunitätskosten. Nach durchgeführten Instandsetzungsmaßnahmen entspricht der Systemzustand in etwa dem einer Neuanlage.

Nach erfolgter Instandhaltungsstrategiemodellierung ist mit der Zuordnung der Instandhaltungskosten und einer Machbarkeitsprüfung die Bewertung der Strategien 1...m abgeschlossen. Nun kann mittels einer Gegenüberstellung die für die einzelnen Investitionsstrategien 1...X jeweils wirtschaftlichste Instandhaltungsstrategie selektiert werden (vgl. Abbildung 26). Abschließend lässt sich aus der Auflistung von Investitions- und Instandhaltungsstrategie die mit Lebenszyklusperspektive wirtschaftlichste Investitionsstrategie bestimmen. Eine qualitativ hochwertige Investitionsentscheidung kann getroffen werden.

5.4 Anwendungsleitfaden

Aufbauend auf der in Abschnitt 5.3 gegebenen ausführlichen Beschreibung, werden zum Abschluss des Kapitels die notwendigen Arbeitsschritte und Eingangsinformationen in der Anwendung der integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien zusammenfassend erläutert. Abbildung 29 benennt die einzelnen Arbeitsschritte und stellt sie in Zusammenhang. Wesentlich für die Investitionsstrategiebewertung (A) sind die Erkenntnisse aus der Eisenbahnbetriebssimulation und die erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse, bestehend aus Lebenszykluskostenberechnung und qualitativer Nutzenbewertung anhand von Nutzenpunkten. Kern der Instandhaltungsstrategiebewertung ist zum einen die Beschreibung der Infrastrukturelemente 1...N der attraktiven, zuvor identifizierten Investitionsstrategien 1...X in ihrem Zustands- und Ausfallverhalten und zum anderen die damit in Zusammenhang stehenden Kosten für Instandhaltungsmaßnahmen (Ereignisse E). Letzteres ist das objektive Selektionskriterium der wirtschaftlichsten Instandhaltungsstrategie für die jeweilige Investitionsstrategie und den dabei geltenden betrieblichen und unternehmerischen Randbedingungen.

Abbildung 29 bildet damit den Leitfaden in der Anwendung des neuartigen Bewertungsverfahrens und schafft Orientierung in der Durchführung der Fallstudie. Diese ist zur Verdeutlichung des Verfahrens der integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien sowie ihres praktischen Nutzens in nachfolgendem Kapitel 6 beschrieben. Die in Abschnitt 5.2 aufgeführten drei Thesen sind daran zu be- bzw. widerlegen.

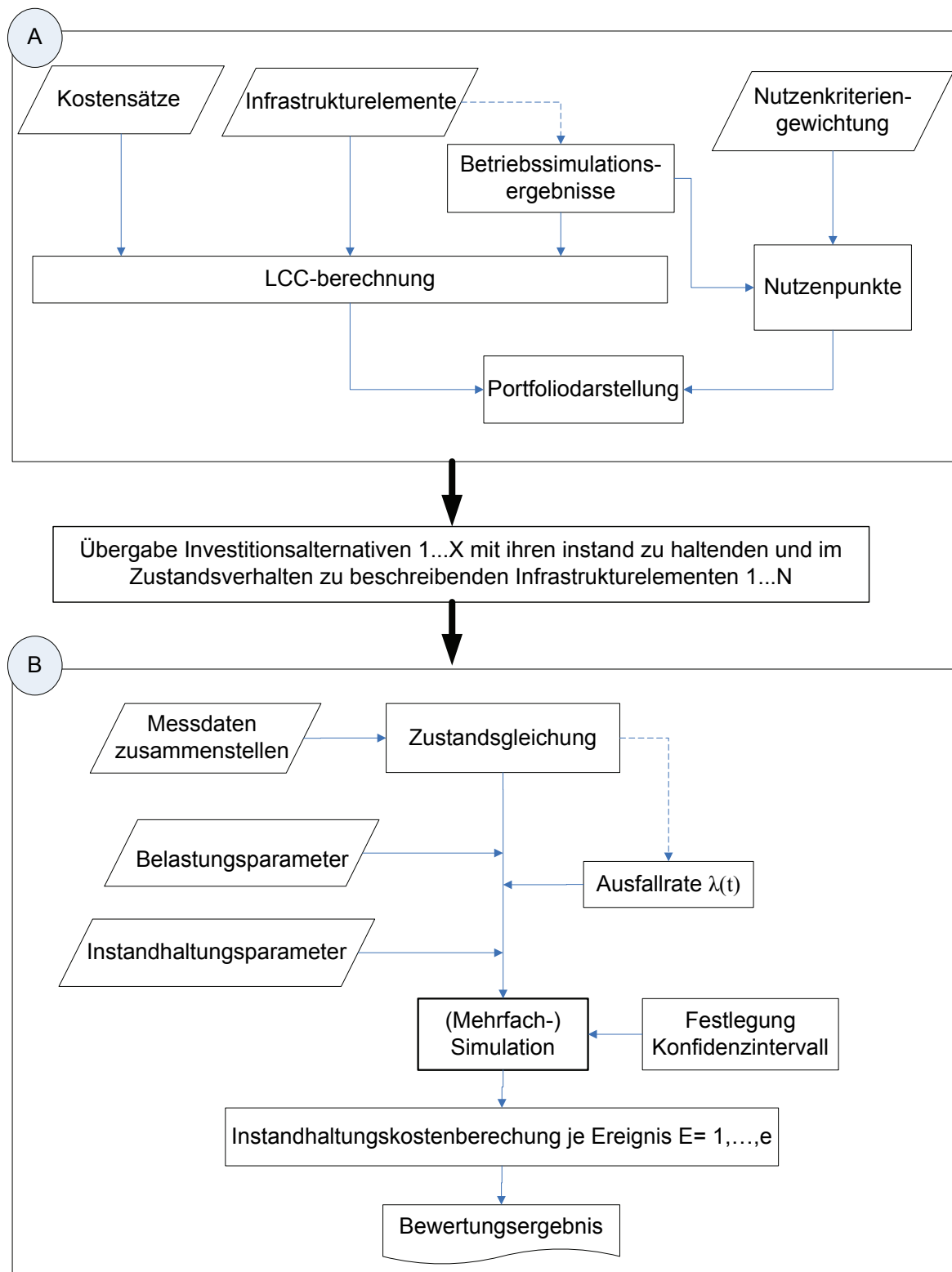


Abbildung 29: Schrittfolge bei Durchführung einer integrierten Bewertung

6 Fallstudie

Die Frage nach einem wirtschaftlicheren Betrieb der Bahnen stellt sich besonders auf Nebenstrecken⁵⁰, welche mit etwa 10.000 km Gesamtstreckenlänge etwa 25 bis 30 Prozent des Gesamtnetzes in Deutschland bilden. Hier wird die Versorgung in hohem Maße durch Subventionen von Bund und Ländern aufrecht erhalten. Eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit, d. h. ein gutes Verhältnis von monetärem Aufwand zum Nutzen, und damit einer möglichen Senkung der Subventionen bei Sicherung der Streckenbewirtschaftung und Vermeidung drohender Streckenstilllegungen ist sowohl für Infrastrukturbetreiber wie für die Volkswirtschaft von hohem Interesse. Daneben besteht für Nebenstrecken in Deutschland oftmals ein hoher Investitionsstau aufgrund unterlassener Unterhaltung bzw. veralteter Technik. Dies ergibt die dringende Notwendigkeit für die Anwendung eines wissenschaftlich fundierten Bewertungsschemas mit dem es gelingt, frühzeitig ökonomische Zielgrößen beim Betrieb von Nebenstrecken zu berücksichtigen [Zim02] [Sch09]. Zur Verdeutlichung der praktischen Anwendbarkeit des in Kapitel 1 erläuterten Verfahrens der integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien soll deshalb ein Netzabschnitt aus dem deutschen Nebenstreckennetz exemplarisch analysiert werden.

Die sich daraus ergebenden Chancen (Nutzen) wie auch mögliche Schwierigkeiten bei der Umsetzung der Methodik werden nachvollziehbar dargestellt. Dabei kommt es an dieser Stelle nicht darauf an, alle in Frage kommenden Investitions- und Instandhaltungsstrategien vollständig abzubilden und zu bewerten. Die Annahmen zu anfallenden Kosten und deren Höhe wurden in Anlehnung an praktische Erkenntnisse getroffen.

Zunächst ist der Untersuchungsraum näher beschrieben (Abschnitt 6.1). Daran anschließend werden in den Abschnitten 6.2 und 6.3 die in Abbildung 26 dargestellten Schritte für eine integrierte Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien für die Bahnsicherungstechnik verdeutlicht. Abschließend wird darauf aufbauend in Abschnitt 6.4 die Entscheidungsgrundlage gegeben.

6.1 Der Untersuchungsraum

Bei dem beispielhaft bewerteten Streckenabschnitt (Abbildung 30) handelt es sich um eine real existierende Schienenverkehrsinfrastruktur, für die aktuell Investitionsüberlegungen vorgenommen werden.

⁵⁰ Wesentliche Merkmale von Nebenstrecken sind nach ZIMMER eingleisige Strecken, eine Streckenhöchstgeschwindigkeit von 80 km/h bis ggf. 120 km/h sowie Haltepunktabstände von im Mittel 3 bis 5 km [Zim02]. In Anlehnung an die von der DB Netz AG getroffene Kategorisierung handelt es sich hierbei um Regionalverkehrsstrecken [DB02b].

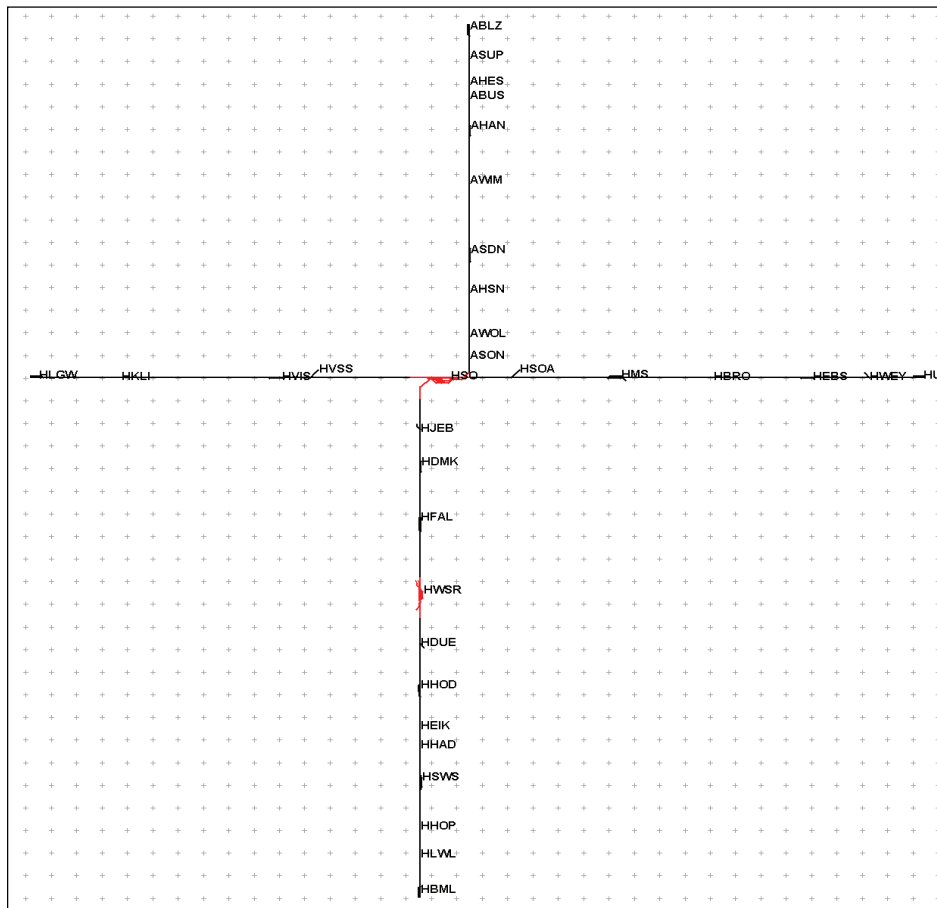


Abbildung 30: Beispielstrecke

Der Untersuchungsraum weist folgende wesentliche Charakteristika auf:

- Die Strecke ist eingleisig und wird im Zweirichtungsbetrieb betrieben.
- Die auf dieser Strecke geltende Streckenhöchstgeschwindigkeit v_{\max} beträgt 80 km/h.
- Die Gesamtstreckenlänge umfasst ca. 200 km.
- Entsprechend des vorgegebenen Fahrplans verkehrt jeweils ein Zug je Stunde und Richtung.
- Die Strecke wird etwa zwischen 4:00 Uhr und 1:00 Uhr täglich betrieben.
- Es gilt an allen Tagen im Jahr derselbe Fahrplan.

Auf die Infrastruktur wirken die in Deutschland üblichen Umweltbedingungen. Mit dem definierten Fahrplan sind die Nutzungshäufigkeit und -intensität als weitere relevante Einsatzbedingungen (vgl. Abschnitt 6.3 - Instandhaltungsstrategiebewertung) vorgegeben.

Abbildung 30 zeigt die räumliche Anordnung der sich kreuzenden Streckenabschnitte sowie die sich dort befindlichen Bahnhöfe und Haltepunkte wie sie in der Betriebssimulation hinterlegt sind. Bahnhof HSO bildet den Knotenpunkt für die beiden Verkehrsachsen Nord-Süd und Ost-West.

6.2 Investitionsstrategiebewertung

Das entwickelte Verfahren soll entsprechend den obigen Ausführungen an dem Streckenbeispiel des Nebenstreckensektors (vgl. Abbildung 30) verdeutlicht werden. Es gilt für die bestehende, voll ausgerüstete Strecke alternative Varianten der Ausrüstung mit Bahnsicherungstechnik zu finden und hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit zu bewerten [Bec08]. Damit soll die aktuell verbaute Technik als Referenzszenario gelten. Entsprechend den in Abschnitt 3.1.1 gemachten Ausführungen bildet dabei die Ermittlung der LCC einen wesentlichen Bestandteil des Bewertungskonzepts. Es geht hier zum einen um den Prozess der wirtschaftlichen Analyse zur Abschätzung der gesamten Beschaffungs- und Besitz- sowie Entsorgungskosten [DIN05] der Bahnsicherungstechniksysteme. Desweiteren schließt dies die Erfassung der Nutzenparameter der alternativen Ausrüstungsvarianten ein.

6.2.1 Randparameter

Um alternative Investitionsstrategien für das Streckenbeispiel definieren und bewerten zu können, sind einige für die Untersuchung relevante Randbedingungen festzulegen. Für die nachfolgende Bewertung gilt:

1. Es erfolgt die Bewertung sich verändernder Streckenausstattungsmerkmale mit Elementen der Bahnsicherungstechnik. Andere Streckenparameter wie etwa Gleislänge, Tunnel etc. werden weder quantitativ noch qualitativ bewertet, da diese in den Investitionsalternativen unverändert bleiben.
2. Für die Ermittlung der LCC ist die Länge der Lebensdauer der Anlagen entscheidend. Hierfür wird ein Betrachtungszeitraum von 25 Jahren⁵¹ angenommen, der in etwa der über alle Anlagen der Bahnsicherungstechnik gemittelten Nutzungsdauer entspricht. Entsprechend erfolgt keine Differenzierung der (Rest-)Lebensdauer zwischen den neu anzuschaffenden Anlagen und den Altanlagen⁵². Der Wert von 25 Jahren ergibt sich zum einen aus den praktischen Erfahrungen und entspricht zum anderen der in [Hei00] verwendeten Lebensdauer von Außenanlagen der Sicherungstechnik.
3. Eine Betrachtung möglicher Liquidationserlöse oder zwischenzeitlicher Ersatzinvestitionen erfolgt nicht. Dass der Aspekt der Liquidationserlöse außen vor gelassen wird, ist durchaus sachgerecht. Denn sollten trotz Restbuchwerten nahe null noch Resterlöse erzielbar sein, dann sind sie aller Voraussicht nach gering und spielen für die Kennzahl Wirtschaftlichkeit aufgrund ihres Eintritts am Ende der Lebensdauer und damit einer starken Abzinsung zum Investitionszeitpunkt kaum eine Rolle.

⁵¹ Es wird keine Unterscheidung zwischen der technischen und wirtschaftlichen Nutzungsdauer gemacht. Vielmehr wird angenommen, dass der Zeitpunkt der technischen Außerbetriebnahme der Systeme dem Ende der wirtschaftlich sinnvollen Lebensdauer entspricht.

⁵² Eine einheitliche (Rest-)Lebensdauer entspricht aufgrund der zum Teil großen technologischen Unterschiede der im Feld befindlichen Technik [SS07] [Bor07] nicht der Realität. Für die hier im Vordergrund stehende Erläuterung des Verfahrens sei diese Annahme legitim.

4. Für die Abzinsung der jährlichen Geldströme wird ein nominaler interner Zinssatz von 8 Prozent verwendet. Dies entspricht dem im Umfeld der Bahn verwendeten Zinssatz.
5. Obwohl Subventionen durch die öffentliche Hand für den Verkehrsträger Schiene eine wichtige Rolle spielen und in der Praxis einen entsprechenden Einfluss auf die Investitionsentscheidungen nehmen, werden Subventionen an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Dies hat im Wesentlichen zwei Gründe. Zum einen verzerren Subventionen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Zum anderen sind die deutschen und europäischen Subventionsregularien sehr vielschichtig⁵³, was eine möglichst genaue Berücksichtigung von Subvention erschwert.
6. Gleiches gilt für mögliche steuerliche Effekte ([Kru07], S. 117 ff.) ([BLS06], S. 105 ff.). Sie sollen aufgrund der vielschichtigen Zusammenhänge im deutschen Steuerrecht an dieser Stelle keine Berücksichtigung finden.
7. Bei der Bewertung erfolgt keine detaillierte Berücksichtigung von technikabhängigen Migrationsdauern. Der wirtschaftlichen Gegenüberstellung der Investitionsalternativen liegt die Annahme zugrunde, dass die Inbetriebnahme alternativer Streckenausrüstungen parallel zum laufenden Betrieb erfolgen kann.
8. Bei der Erfassung der jährlichen Betriebskosten bleiben die Energiekosten für den Betrieb der Stellwerke unberücksichtigt. Durch den vermehrten Einsatz von energiesparender Technik (z.B. LED-Technologie) spielen diese zukünftig eine untergeordnete Rolle.
9. Es werden keine möglichen Änderungen im Fahrplan (an 365 Tagen/ Jahr) und damit in der Streckenbelastung berücksichtigt. Diese Annahme ist zulässig, da sich der Kapazitätsbedarf in den meisten Fällen mittel- bis langfristig auf den Nebenstrecken nicht bzw. in vergleichsweise geringem Umfang ändern wird ([Zim02], S. 44). Zudem wird ein über alle Tage im Jahr gleicher Fahrplan zugrunde gelegt. Neben der Nutzungshäufigkeit werden auch das Umfeld und die dort wirkenden Umwelteinflüsse als konstant belassen. Dies ist im Rahmen der hier durchgeführten Bewertung durchaus realistisch, da die verbauten sicherungstechnischen Systeme an der Strecke belassen werden und somit lediglich mit den über das Jahr auftretenden klimatischen Schwankungen ausgesetzt sind.
10. Die Wirtschaftlichkeitsbewertung erfolgt analog zu Abbildung 26 (siehe Abschnitt 5.3) zunächst ohne Betrachtung der Instandhaltungskosten. Deren Erfassung erfolgt separat in Abhängigkeit von den Instandhaltungsstrategien.
11. Die Entsorgungsphase bleibt mit der in Abschnitt 3.2.1 gegebenen Begründung unberücksichtigt.

⁵³ So wird die Ausrüstung einer Strecke mit ETCS-Technik beispielsweise in anderem Umfang gefördert als die Installation von herkömmlicher Technik (vgl. [Kal07]).

6.2.2 Identifikation von Investitionsstrategien

Um alternative Investitionsstrategien bewerten zu können, müssen zunächst die prinzipiell geeigneten Alternativen identifiziert werden. Dazu müssen die Anforderungen an Leistung und Qualität des Systems bekannt sein, die es von den in Frage kommenden Alternativen zu erfüllen gilt. Darauf aufbauend können die möglichen Betriebsverfahren und damit die alternativen Streckenausrüstungen bestimmt werden.

6.2.2.1 Muss-Anforderungen

Bei der Bestimmung von Investitionsalternativen sind zunächst jene Anforderungen zu identifizieren, die als sogenannte „Muss-Kriterien“ zwingend erfüllt sein müssen. Für den hier beschriebenen Anwendungsfall werden

- eine Streckengeschwindigkeit größer gleich 80 km/h sowie
- eine Mindeststreckenkapazität in Form des geforderten Fahrplans

als Muss-Anforderungen identifiziert. Damit wird von allen Alternativen erwartet, dass sich mit ihnen mindestens die entsprechend des Fahrplans geforderte Transportnachfrage⁵⁴ erfüllen lässt. Gleichzeitig ergeben sich daraus für das hier gewählte Anwendungsbeispiel keine Unterschiede in den erzielbaren Trassenerlösen⁵⁵. Der monetär bewertbare Nutzen ist somit für alle Investitionsstrategien gleich (vgl. Abschnitt 6.2.3.3). Eine Übererfüllung des Fahrplans, d. h. die Möglichkeiten zu mehr Zügen auf der Strecke und damit eine erhöhte Leistungsfähigkeit eines Betriebsverfahrens muss dennoch berücksichtigt werden. Dies kann jedoch lediglich auf qualitative Weise erfolgen, denn zusätzliche Trassenerlöse können nur bei konkreter Transportnachfrage erzielt werden. Diese ist in der Regel zum Zeitpunkt der Investition nicht abschätzbar. Die Unterschiede hinsichtlich der Nutzenwirkung der Alternativen ergeben sich somit ausschließlich aus den nicht monetär bewertbaren Nutzenkriterien. Diese sind ausführlich in Abschnitt 6.2.3.4 erläutert.

Alle denkbaren Investitionsalternativen mit denen die genannten Muss-Anforderungen nicht erfüllt werden können, werden somit an dieser Stelle aus dem Bewertungsprozess gestrichen.

6.2.2.2 Definition von Investitionsalternativen

Die Investitionsstrategien in Eisenbahnsicherungstechnik sind zwingend von der Wahl des Betriebsverfahrens⁵⁶ für die auszurüstende Strecke bzw. den auszurüstenden Netzabschnitt abhängig. Somit sind in einem ersten Schritt die technisch wie betrieblich möglichen Betriebsverfahren zu bestimmen, d. h. jene Verfahren mit denen die Anforderungen an die Strecke hinsichtlich Geschwindigkeit, Kapazität und Sicherheit erfüllt werden können. Daraus ergeben

⁵⁴ Eine in der Praxis übliche Kapazitätsreserve ist in dem Fahrplan bereits enthalten.

⁵⁵ Trassenerlöse entsprechend den von den EVUs zu zahlenden Entgelten, die sie für die Nutzung der Infrastruktur an das EIU zu entrichten haben.

⁵⁶ Ein Betriebsverfahren ist definiert als ein „System betrieblicher Regeln und technischer Mittel zur Durchführung von Fahrten mit Eisenbahnfahrzeugen auf einer Eisenbahninfrastruktur“ ([NP04], S. 33).

sich die notwendigen streckenseitigen sicherungstechnischen Ausrüstungsvarianten, die es hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit zu bewerten gilt.

Es wird aus der nachfolgenden Tabelle 2 ersichtlich, dass neben dem Referenzszenario, also dem aktuellen Betrieb auf der Strecke mittels Zugmeldeverfahren mit MSTWs, drei weitere Ausrüstungsvarianten bewertet werden. Sie stellen entgegen einer Weiterbewirtschaftung der Strecke nach dem Zugmeldeverfahren (vgl. [DB06a]) unter Einsatz mechanischer Stellwerke „echte“ Investitionsstrategien dar, da ihr Einsatz zunächst mit zahlungswirksamen Umrüstungen an der Strecke durch Einbau neuer Technik und Rückbau bestehender Bahnsicherungstechnik verbunden sind.

In Anlehnung an die VDV-Schrift 752 [VDV04] und unter Berücksichtigung der Streckenparameter ist der Streckenbetrieb

- mittels eines elektronischen Stellwerks (ESTW) nach dem Zugmeldeverfahren,
- durch Einsatz von Streckensignalisierung und Gleisfreimeldung unter Verwendung eines elektronischen Stellwerks für den signalisierten Zugleitbetrieb (ESZB) oder
- ohne Verwendung technischer Unterstützung mit Einsatz von vier Zugleitern nach dem Zugleitbetrieb

alternativ denkbar.

An dieser Stelle sollen die hier ausgewählten Betriebsverfahren nur kurz benannt werden. Für eine detaillierte Beschreibung der Betriebsverfahren wird auf einschlägige Literatur verwiesen [Pac05]; [Sch06], [Sch07b], [Sch07a].

Im Zugmeldeverfahren wird die Zugfolge durch Zugmeldungen geregelt und gesichert, die vom Fahrdienstleiter erteilt werden. Mittels der Zugmeldungen wird eine Zugfahrt gegen nachfolgende sowie entgegenkommende Schienenfahrzeuge gesichert. Wird das Zugmeldeverfahren mit elektronischen Stellwerken (ESTW) umgesetzt, dann wird rechnerbasiert sichergestellt, dass alle notwendigen Voraussetzungen für das Zulassen einer Zugfahrt erfüllt sind. Im Gegensatz dazu erfolgt für das ausgewählte Streckenbeispiel aktuell der Betrieb im Zugmeldeverfahren unter Einsatz mechanischer und elektromechanischer Stellwerke. Dies führt zu niedrigen Stellentfernungen und damit zu einem wesentlich höheren Personalbedarf für kleine, lokale Stellbereiche.

Eine Alternative dazu bietet der Zugleitbetrieb vor allem für Strecken mit einfacheren betrieblichen Verhältnissen.

Der Zugleitbetrieb ohne technische Unterstützung, als die einfachste Form des Zugleitbetriebs, basiert auf Zuglaufmeldungen zwischen den verantwortlichen Zugleitern ohne bzw. mit wenigen Sicherungsanlagen. Der Zugleitbetrieb kann jedoch nur bis zu einer maximalen Streckengeschwindigkeit von 80 km/h betrieben werden. Durch die fehlende technische Unterstützung der Zugleiter sind für das Streckenbeispiel vier Zugleiter notwendig. Eine Weiterentwicklung des einfachen Zugleitbetriebs ist der signalisierte Zugleitbetrieb mit dem Streckengeschwindigkeiten von bis zu 120 km/h möglich sind. Dies wird durch den Einsatz eines verein-

fachten Signalsystems möglich. Für die hier bewertete Investitionsalternative des signalisierten Zugleitbetriebs wird davon ausgegangen, dass die Gesamtheit der Stellbefehle von zwei Zugleitern vorgenommen und über ein Fernwirkssystem an die lokalen Arbeitsplätze übertragen wird. [NP04]

Dem Schritt der Bestimmung alternativ möglicher Investitionsstrategien schließt sich deren Simulation und Bewertung an (vgl. Abbildung 26).

6.2.3 Simulation & Bewertung

Zur Orientierung sind einleitend in Abschnitt 6.2.3.1 die im Rahmen der Fallstudie ergriffenen Schritte zur Investitionsstrategiebewertung benannt. Die Ausführung und die dabei gewonnenen Ergebnisse sind in den Abschnitten 6.2.3.2 bis 6.2.3.4 erläutert.

6.2.3.1 Schrittfolge Investitionsstrategiebewertung

In Anlehnung an die Ausführungen in Abschnitt 5.4 sind folgende Arbeitsschritte im Rahmen der Investitionsstrategiebewertung durchzuführen.

1. Es sind die identifizierten Investitionsalternativen in der Simulationsumgebung zu hinterlegen (vgl. Tabelle 2) und zur Bewertung ihrer betrieblichen Qualität zu simulieren (vgl. Abschnitt 6.2.3.2).

Mit den Erkenntnissen aus den Simulationsläufen erfolgt die Bewertung der Investitionsstrategien.

2. Die verfügbaren statischen und dynamischen Informationen (Kostensätze, Infrastrukturelemente, Betriebssimulationsergebnisse) werden in der rein monetären, finanzanalytischen Bewertung verarbeitet (LCC-Berechnung). Die dabei ermittelten Zahlen der LCC sind für die Alternativen in ihrem Verlauf vergleichend in Abbildung 32 gegenübergestellt. (vgl. Abschnitt 6.2.3.3)
3. Anschließend erfolgt die nutzwertanalytische Bewertung. Hier sind zunächst die bewertenden Nutzenkriterien zu identifizieren (vgl. Tabelle 3) und zu gewichten (vgl. Anhang D) und dann mittels Simulationsergebnissen und Expertenmeinungen für die einzelnen Investitionsstrategien zu bewerten (vgl. Tabelle 4). (vgl. Abschnitt 6.2.3.4)
4. Abschließend werden die Ergebnisse aus quantitativer und qualitativer Bewertung zusammengeführt, um so eine Aussage hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit der in Abschnitt 6.2.2 identifizierten Investitionsalternativen machen zu können. (vgl. Abschnitt 6.2.3.5)

Zur Verdeutlichung schafft Abbildung 31 eine Einordnung der einzelnen Schritte und (Zwischen-)Ergebnisse, wie sie nachfolgend erarbeitet werden, in den Gesamtprozess der Investitionsstrategiebewertung.

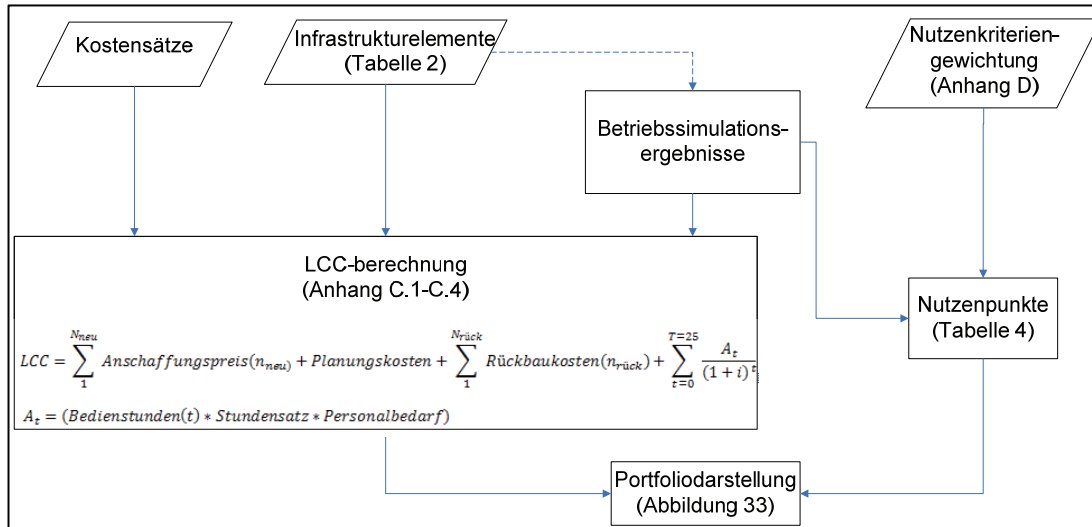


Abbildung 31: Schrittfolge Investitionsstrategiebewertung – angewandt

6.2.3.2 Simulation

Um eine Simulation der identifizierten Investitionsalternativen zu ermöglichen, sind zunächst einige streckenspezifische Daten zu beschaffen. So sind für das hier analysierte Fallbeispiel

- Infrastrukturdaten,
- Fahrzeugdaten,
- Fahrplandaten,
- betrieblichen Daten (Ausweichgleise, Haltezeiten etc.) sowie
- Störungsdaten

zusammenzutragen und in der Simulationsumgebung RailSys® zu hinterlegen ([Rad06], S. 102). Für eine mikroskopische Eisenbahnbetriebssimulation ist die metergenaue Abbildung des Streckennetzes anhand von Knoten und Kanten sowie den vorgesehenen Fahrwegelementen und Sicherungsanlagen notwendig. Für die Abbildung des Fahrplans werden Umläufe für zuvor zusammengestellte Züge erstellt.

Die sich aus den Betriebsverfahren ergebende notwendige sicherungstechnische Infrastruktur ist vergleichend in Tabelle 2 dargestellt.

| | Investitionsalternative (Betriebsverfahren) | Referenzsystem – Zugmeldever- fahren mit MSTW (A0) | Zugmeldever- fahren mit ESTW (A1) | Zugleitbetrieb mit ESTW – ESZB (A2) | Zugleitbetrieb ohne techni- sche Unterstüt- zung – ZLB (A3) |
|----------|--|---|---|---|--|
| | Bahnsicherungstechnik Infrastruktur | | | | |
| Technik | Rückfallweiche | 0 | 0 | 0 | 24 |
| | manuell ortsbediente Weiche | 0 | 0 | 0 | 39 |
| | mech. fernbediente Weiche | 63 | 0 | 0 | 0 |
| | elektr. fernbediente Weiche | 0 | 63 | 63 | 0 |
| | Vorsignal | 36 | 36 | 36 | 0 |
| | Hauptsignal | 85 | 85 | 85 | 0 |
| | Gleisstromkreis | 85 | 0 | 0 | 0 |
| | Achszähler | 0 | 85 | 85 | 0 |
| | Gleismagnet | 206 | 206 | 206 | 0 |
| | Haltetafel | 33 | 33 | 33 | 53 |
| | Trapeztafel | 0 | 0 | 0 | 23 |
| | MSTW | 14 | 0 | 0 | 0 |
| | EMSTW | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | ESTW | 0 | 1 | 0 | 0 |
| | ESTW-A | 0 | 10 | 0 | 0 |
| Personal | Zugleiter | 0 | 0 | 2 | 4 |
| | lokaler Arbeitsplatz für ESZB | 0 | 0 | 9 | 0 |

Tabelle 2: Investitionsalternativen Fallbeispiel [BSJ08]

Daraus wird ersichtlich, dass im Falle eines Streckenbetriebs mittels Zugleitbetrieb ohne technische Unterstützung entgegen den anderen Investitionsalternativen Rückfallweichen zum Einsatz kommen. Rückfallweichen unterscheiden sich von den übrigen Weichentypen, dass sie

nicht bedient werden müssen und somit Zugkreuzungen in nicht besetzten Bahnhöfen ermöglichen. Dies wiederum trägt zur Rationalisierung des Streckenbetriebs bei.⁵⁷ Dabei kommt für diese Investitionsstrategie eine im Vergleich zu den drei anderen Investitionsstrategien einfache Sicherungstechnik zum Einsatz.

6.2.3.3 Finanzanalytische Bewertung

Bei der Festlegung der zu berücksichtigenden Kostenarten wird der Umstand berücksichtigt, dass der Aufwand für eine LCC-Analyse im Allgemeinen mit der Anzahl der zu bewerteten Kostenpositionen steigt. Aus diesem Grund sind in der hier durchgeführten LCC-Analyse zur Bewertung der Investitionsalternativen (vgl. Abbildung 32) jene Kosten berücksichtigt, die einen deutlichen Einfluss auf die gesamten Lebenszykluskosten der Bahnsicherungstechnik am betrachteten Streckenabschnitt haben. Unter dieser Prämisse werden folgende Kosten in der Bewertung der Investitionsalternativen berücksichtigt (vgl. Abbildung 9):

- Anschaffungskosten
 - Kaufpreis
 - Planungskosten
 - Rückbaukosten (bezogen auf die Außenanlagen, keine Stellwerks-gebäude)
- Besitzkosten (pro Jahr)
 - Betriebskosten (exkl. Energiekosten und Instandhaltungskosten)

Der Kaufpreis umfasst neben der eigentlichen Anschaffung der Anlagen auch die Projektleitung, Projektierung, Montage und Prüfung der Anlagen sowie notwendige Schulungen. Des Weiteren sind Aufwendungen für notwendige Anpassungen der Nachbarstellwerke enthalten. Damit wird den Gegebenheiten in der Praxis entsprochen, bei denen in der Regel alle aufgelisteten Leistungen beim Kauf eines Systems durch den Signaltechnikhersteller abgedeckt werden.

Die jährlichen Besitzkosten setzen sich primär aus den Personalkosten zusammen. Sie entstehen durch die Bereitstellung von Fahrdienstleitern oder Zugleitern, deren Aufgabe es ist, einen funktionsfähigen und sicheren Schienenverkehr zu ermöglichen. Für die Bestimmung der Betriebskosten müssen

- die Anzahl an Bedienpersonal,
- die jährlichen Betriebsstunden für den Netzabschnitt und
- der Stundensatz für das Betriebspersonal

bekannt sein. Die Anzahl des notwendigen Bedienpersonals ist abhängig von der Investitionsstrategie. Die Betriebsstunden ergeben sich aus dem Fahrplan und können aus der Betriebs-

⁵⁷ Rückfallweichen erlauben jedoch kein beliebiges Befahren. Sie können zwar „stumpf“ aus beiden Richtungen befahren werden, „spitz“ jedoch nur in die von der aktuellen Zungenlage vorgegebenen Richtung.([NP04], S. 171)

simulation gewonnen werden ($\sim 7400\text{h/a}$). Der Stundensatz ist unternehmensabhängig. Im Fallbeispiel wird mit 40 GE/h gerechnet.

Die finanzanalytische Bewertung einer Investition in ein Zugmeldeverfahren mit ESTW (siehe Tabelle 2, A1) wird in ihrer Anschaffung anhand der Anzahl der Stelleinheiten⁵⁸ vorgenommen. Begründet wird dies durch die bei der DB Netz AG üblichen Praxis ([Lie07], S. 60).

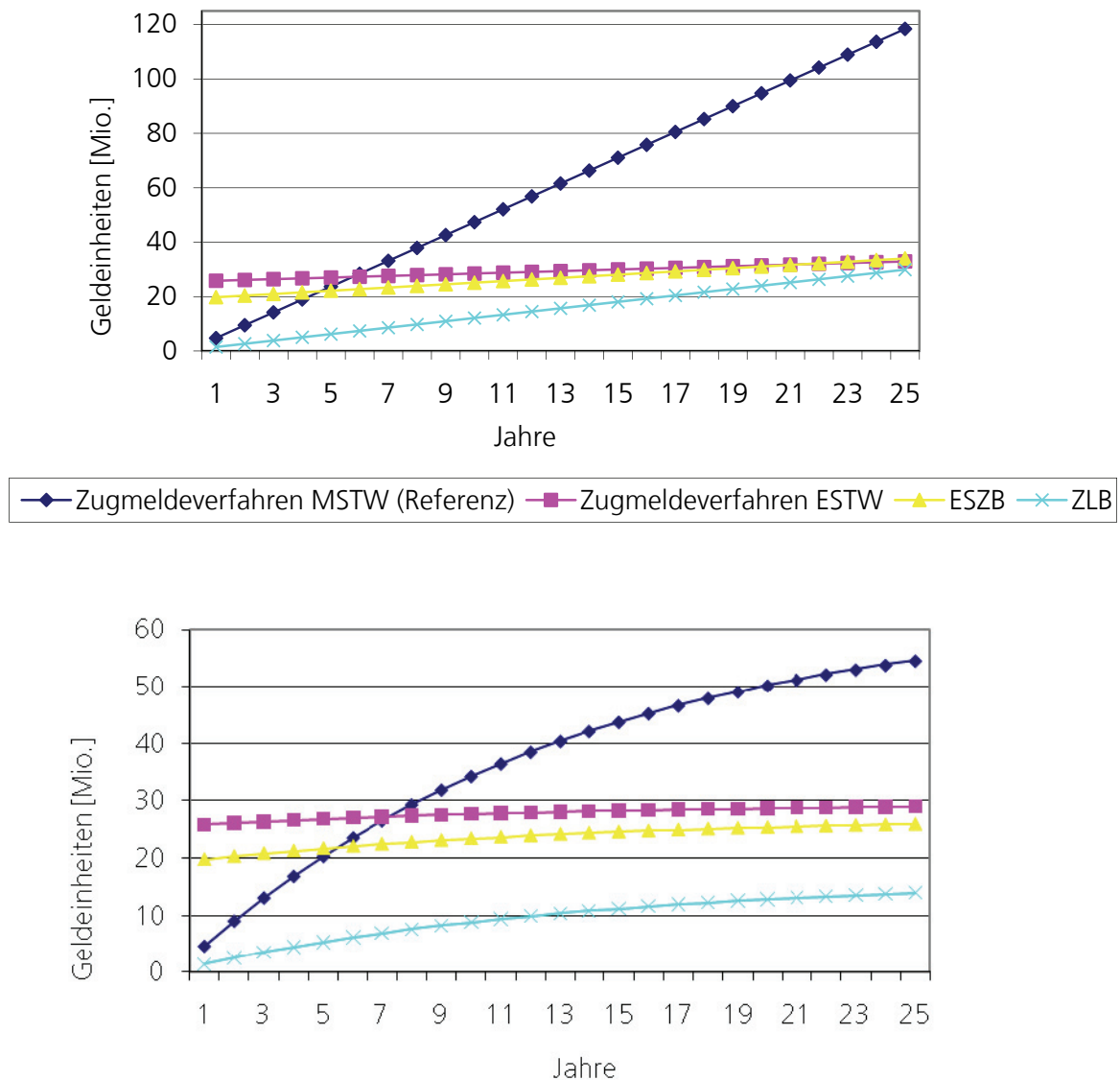


Abbildung 32: Kumulierte LCC für Beispielstrecke ohne (oben) und mit (unten) Diskontierung

Durch eine zentralere Betriebsführung und den damit verbundenen Einsparungen bei den Personalaufwendungen weisen der Zugmeldebetrieb mittels ESTW und der ESZB im Vergleich zum Referenzszenario wesentlich geringere Betriebskosten auf. Gleichzeitig sind diese beiden

⁵⁸ Als eine Stelleinheit werden die Komponenten Weiche, Gleissperre, Hauptsignal und Zusatzanzeiger verstanden ([Bor07], S.7)

Investitionsalternativen durch höhere Investitionsaufwendungen gekennzeichnet, die sich aus der für die Umsetzung der BV notwendigen Infrastruktur mit höherem Automatisierungsgrad ergeben. Aufgrund der geringeren jährlichen Kosten ist für die Investitionsstrategien „Zugmeldeverfahren mit ESTW“ und „Zugleitbetrieb mit ESTW (ESZB)“ trotz der anfallenden Anfangsinvestitionen der Break-even-Punkt mit dem Istzustand (Referenzszenario) bereits nach ca. sieben Jahren bzw. nach fünf Jahren erreicht (siehe Abbildung 32). Eine Investition in den Zugleitbetrieb ohne technische Unterstützung ist unter den vier Strategien die kostengünstigste Variante. Neben den anfänglichen Rückbaukosten und geringfügigen Investitionen in neue Signalanlagen bedarf es auch im Betrieb deutlich weniger personeller Ressourcen als bei Weiterbewirtschaftung des Istzustands. (vgl. Anhang C.1-C.4) Abbildung 32 macht zudem die Dringlichkeit einer Reinvestition in den betrachteten Streckenabschnitt deutlich. Die Spanne zwischen den Kosten bei Weiterbewirtschaftung der bestehenden Infrastruktur und dem Einsatz alternativer Technik ist auffallend groß und spricht trotz anfänglicher Mehrkosten für den Einsatz anderer Sicherungstechnik.

Welche Bewertung die vier Investitionsstrategien hinsichtlich der qualitativen Bewertungskriterien erfahren, wird mit der nun folgenden nutzwertanalytischen Bewertung betrachtet.

6.2.3.4 Nutzwertanalytische Bewertung

Zunächst gilt es im Rahmen der Nutzwertanalyse die relevanten Nutzenkriterien [FKH03] zu bestimmen. Relevant bedeutet erfolgswirksam aus Sicht des Infrastrukturbetreibers. Dabei sollte sich auf eine kleinere Anzahl sehr aussagekräftiger Kriterien beschränkt werden. Denn bei zu vielen Kriterien sinkt die mit einer Nutzwertanalyse erzielbare Aussagekraft. Sie sind die Indikatoren, an denen die Qualität der Investitionsstrategie bewertet wird. Deren Bewertung trägt erheblich zu einer fundierten Investitionsempfehlung bei, die nicht ausschließlich auf dem Ergebnis einer LCC-Analyse beruht. Die Auswahl der differenzierenden Nutzenkriterien richtet sich stets nach dem Entscheidungsumfeld. An dieser Stelle sind jene Kriterien identifiziert (siehe Tabelle 3), die wesentlich für eine vergleichende Nutzenbewertung alternativer Betriebsverfahren für den Nebenstreckenbetrieb sind.⁵⁹ Des Weiteren ist in Tabelle 3 aufgeführt, was unter jedem einzelnen Nutzenkriterium zu verstehen ist (vgl. u. a. [DB02a]). [BSJ08]

⁵⁹ Die in Tabelle 3 zusammengetragenen Nutzenkriterien erheben nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Es wird sich hierbei auf Expertenmeinungen berufen [Tro06], [Zim02], [DB02a]. In einer realistischen Investitionsentscheidungssituation können andere bzw. zusätzliche Kriterien relevant sein.

| Nutzenkriterium | Bemerkung |
|---|---|
| 1. Sicherheit | Art der Zugsicherung, Art der Gleisfreimeldung |
| 2. Dispositionsmanagement | Möglichkeiten des Betriebsverfahrens, Informationen in geringer Zeit zu gewinnen, die eine Disposition ermöglichen bzw. effizienter gestalten |
| 3. maximale Streckengeschwindigkeit | die maximal mit der Investitionsalternative zulässige Streckengeschwindigkeit; dieses Nutzenkriterium ermöglicht die Abbildung des allgemeingültigen Zusammenhangs von Schnelligkeit der Verbindung und Attraktivität des Verkehrsträgers |
| 4. Zuglaufverfolgung für Fremdnutzung | Grundlage für Fahrgastinformationssysteme ist das Vorhandensein von Zuglaufverfolgungssystemen |
| 5. Möglichkeit von Zugkreuzungen/ Zugüberholungen | umfasst sowohl planmäßige als auch außerplanmäßige; Möglichkeit für zukünftige Fahrplanänderung |
| 6. Verspätungsabbau | Kriterium wird über Summe der Verspätungsminuten erfasst; je weniger, desto besser |
| 7. Flexibilität bei baulicher Umgestaltung des Bahnhofs | Aufwand für spätere Erweiterungen/ Veränderungen des Bahnhofs |
| 8. Störungsmanagement (Infrastruktur) | Effizienz der Störungsbeseitigung; Effizienz des Umgangs mit einer Störung (Rückfallebene) |
| 9. Kapazitätsüberschuss | Möglichkeit des Betriebsverfahrens, ein steigendes Verkehrsaufkommen bewältigen zu können |

Tabelle 3: Auswahl monetär nicht bewertbarer Nutzenaspekte

Die Kriterien 1 bis 9 sind vorrangig rein qualitativ zu bewerten. So ergibt sich die Bewertung der Kriterien Sicherheit, Dispositionsmanagement, Zugkreuzungen/ Zugüberholungen, Flexibilität baulicher Umgestaltungen, Störungsmanagement sowie Kapazitätsüberschuss nur begrenzt aus den Simulationsresultaten. Für ihre Bewertung ist vor allem die langjährige Erfahrung mit dem Einsatz der Betriebsverfahren wichtig. Ausnahmen zu einer rein qualitativen Bewertung bilden die Kriterien 3 und 6.

Die maximale Streckengeschwindigkeit (Kriterium 3) wird in Form einer km/h-Angabe erfasst und bestimmt sich zum einen aus den Leistungsparametern der Betriebsverfahren sowie den geltenden Vorschriften. Mit der Bewertung der maximalen Streckengeschwindigkeit erfolgt eine Differenzierung der Investitionsalternativen hinsichtlich der maximal zulässigen Streckengeschwindigkeit. Dass alle vier Strategien die Mindestforderung einer minimalen Streckengeschwindigkeit von 80 km/h erfüllen, wurde vorab (vgl. Abschnitt 6.2.2.1) geprüft.

Für die Bewertung des Kriteriums Verspätungsabbau (Kriterium 6) als ein wesentlicher Qualitätsindikator sind die Ergebnisse der Betriebssimulation zwingend. Mit diesem Kriterium soll der Umgang des Systems mit Störungen betrachtet und bewertet werden. Dabei geht es vor-

rangig um eine Überblicksdarstellung über den zu erwartenden Betrieb und weniger um eine exakte Bewertung einer klar definierten Anzahl und Art von Störungen. Diese sind zum Zeitpunkt der Investition nicht bestimmbar. Zur Beurteilung der Betriebsqualität bei Störungen werden im Rahmen der Betriebssimulation nach frei wählbaren, statistischen Regeln zufällige Elemente eingestreut ([Rad06], S. 59). Für das Fallbeispiel werden für die in RailSys® hinterlegte Verspätungsfunktion (vgl. Formel [13]) folgende Werte für die durchschnittliche (d_m) und maximale Verspätung (d_{max}) sowie die Wahrscheinlichkeit einer Verspätung (P_e) gewählt:

- $d_m = 20 \text{ min}$
- $d_{max} = 60 \text{ min}$
- $P_e = 20\%$

Formel [13] gibt die Wahrscheinlichkeit P_p an, dass eine Verspätung der Größe v auftritt ([Rad06], S. 72 ff) [Rai06].

$$P_p(v) = P_e / d_m \cdot e^{\left(-\frac{1}{d_{max}} \cdot v\right)} \quad [13]$$

Alle vier Investitionsstrategien werden mit den gleichen Parametern der Verspätungsfunktion jeweils 20-mal⁶⁰ simuliert (Mehrfachsimulation). Die dabei entstehenden Verspätungsminuten werden aufgezeichnet. Diese werden über alle Simulationsläufe gemittelt und bilden die quantitative Größe des Nutzenkriteriums Verspätungen. Je nach den Auswirkungen der Verspätungen auf den Betriebsablauf ergibt sich die Höhe der Verspätungsminuten und somit die Höhe eines Verspätungsabbaus innerhalb des betrachteten Netzabschnitts.

Kriteriengewichtung

Die Festlegung der Kriteriengewichte für die $k=9$ Nutzenkriterien ist wichtiger Bestandteil der nutzwertanalytischen Punktebewertung. Sie ist mit viel Sorgfalt durchzuführen, um die Subjektivität der an dieser Stelle den Nutzenkriterien zugeordneten Wichtigkeiten zu minimieren. Es empfiehlt sich hierzu das Matrixverfahren. Bei Anwendung des Matrixverfahrens trifft der Entscheider oder besser das zu entscheidende Team für alle Kriterienpaare i, j ($i \geq 1; j \leq k; i \neq j$) Aussagen, ob das Nutzenkriterium i wichtiger, etwas wichtiger, gleich wichtig, etwas unwichtiger oder unwichtiger als Nutzenkriterium j ist. Entsprechend werden für das Kriterienpaar $i-j$ 4-0, 3-1, 2-2, 1-3 oder 0-4 Wichtigkeitspunkte zugeordnet. Sind alle Kriterienpaare gewichtet, sind die vergebenen Wichtigkeitspunkte auf 100 Prozent zu normieren. Das Matrixverfahren bietet mittels paarweiser Vergleiche eine gute Systematik, um die Gewichtungen der Nutzenkriterien zu bestimmen.

Anhang D zeigt die mittels Matrixverfahren gewonnenen Gewichtungen der k Nutzenkriterien und erläutert an einem Beispiel die Punktezuordnung bzw. -interpretation.

⁶⁰ Es wurden 20 Wiederholungen durchgeführt, um aus den Simulationsergebnissen verlässliche Aussagen hinsichtlich der zu erwartenden Verspätungsminuten zu erhalten.

Punktbewertung des qualitativen Nutzens

Die in Tabelle 4 zugeordneten Gewichtungen für die identifizierten Nutzenkriterien wurden durch institutsinterne Experten (Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR) mittels Matrixverfahren (siehe Anhang D) bestimmt, wobei sich der Zahlenwert daran orientiert, wie stark das jeweilige Kriterium Einfluss auf die Attraktivität des Verkehrsträgers Schiene nimmt. Dabei gilt, umso stärker der Einfluss, desto wichtiger das Kriterium und desto höher der Gewichtungsfaktor.

Für die vier Investitionsstrategien ergeben sich die Punkte zum einen aus den mittels Betriebssimulationen gewonnenen Ergebnissen (Kriterien 3 und 6). Dabei werden die quantitativen Simulationsergebnisse in Nutzenpunkte mittels einer zu definierenden, subjektiven Nutzenfunktion überführt. Zum anderen fließen qualitative Einschätzungen von Betriebsexperten in die Bewertung ein. Im Folgenden werden die an dieser Stelle vergebenen Nutzenpunkte (siehe Tabelle 4) kurz erläutert. Dabei sei darauf hingewiesen, dass die hier vergebenen Nutzenpunkte keinen allgemeingültigen Charakter haben, sondern lediglich auf das hier betrachtete Anwendungsbeispiel bezogen sind.

1. Zum Nutzenaspekt „*Sicherheit*“ erhält der Zugleitbetrieb ohne technische Unterstützung aufgrund des Fehlens eines automatischen Zugsicherungssystems die niedrigste Punktzahl. Die drei übrigen Betriebsverfahren erreichen durch die Verwendung von Signalen und Gleisfreimeldeeinrichtung ein hohes Sicherheitsniveau.
2. Die Verfahren des Zugmeldebetriebs unter Einsatz mechanischer Stellwerke und der Zugleitbetrieb ohne technische Unterstützung erhalten bei dem Nutzenaspekt „*Dispositionsmanagement*“ niedrige Punktzahlen, da sie keine rechnerunterstützte Fahrplanerstellung ermöglichen. Zusätzlich sind unter Verwendung eines mechanischen Stellwerks mehr Fahrdienstleiter in den Dispositionsprozess einzubinden. Die Differenzierung zwischen Zugmeldeverfahren mit ESTW und Zugleitbetrieb mit ESTW wird gemacht, da beim Einsatz des Zugleitbetriebs mit ESTW zwei anstatt nur ein Fahrdienstleiter wie beim Zugmeldeverfahren mit ESTW für Dispositionsentscheidungen benötigt werden.

| Nutzenkriterium | Ge- wichtu ng | Referenzsys- tem – Zug- meldeverfah- ren mit MSTW (A0) | Zugmelde- verfahren mit ESTW (A1) | Zugleitbe- trieb mit ESTW – ESZB (A2) | Zugleitbetrieb ohne techni- sche Unter- stützung – ZLB (A3) |
|---|---------------------|--|--|--|---|
| 1. Sicherheit | 0,222 | 9 | 9 | 9 | 1 |
| 2. Dispositions- management | 0,125 | 1 | 9 | 7 | 3 |
| 3. maximale Stre- ckengeschwindigkeit | 0,097 | 9 | 9 | 7* | 1 |
| 4. Zuglaufverfolgung für Fremdnutzung | 0,028 | 1 | 9 | 9 | 1 |
| 5. Möglichkeit von Zugkreuzungen/ Zugüberholungen | 0,097 | 9 | 9 | 9 | 1 |
| 6. Verspätungsabbau | 0,139 | 2* | 9 | 5* | 1 |
| 7. Flexibilität bei bau- licher Umgestaltung des Bahnhofs | 0,056 | 8 | 5 | 9 | 3 |
| 8. Störungsmanage- ment (Infrastruktur) | 0,153 | 9 | 4 | 6 | 6 |
| 9. Kapazitätsüber- schuss | 0,083 | 9 | 9 | 1 | 1 |
| Total | 1,000 | 6,74 | 8,01 | 6,80 | 2,13 |

*Werte gerundet

Tabelle 4: Qualitative Nutzenbewertung [BSJ08]

3. Unter dem Nutzenaspekt der „maximalen Streckengeschwindigkeit“ sollen mögliche Leistungsreserven, die die Investitionsalternative über die geforderte Mindeststreckengeschwindigkeit hinaus aufweisen, erfasst werden. Da im Zugmeldeverfahren Geschwindigkeiten bis zu 160 km/h gefahren werden können, wird hier die höchste Punktzahl vergeben. Die beiden anderen Investitionsalternativen erlauben maximale Streckengeschwindigkeiten von 120 km/h im Zugleitbetrieb mit ESTW und 80 km/h im Zugleitbetrieb ohne technische Unterstützung. 80 km/h entspricht der geforderten Mindestgeschwindigkeit.

Dafür erhält diese Investitionsalternative die minimale Anzahl an Nutzenpunkten (1). Die Zuordnung der Nutzenpunkte basiert dabei auf folgender Nutzenfunktion (Formel [14]), mit der die Geschwindigkeitswerte in Nutzenpunkte überführt werden.

$$N(x) = 1 + \sqrt{64 \times \frac{x - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}}} \quad [14]$$

mit

- v_{\min} = minimal erreichte Höchstgeschwindigkeit bei den Vergleichsstrategien,
- v_{\max} = maximal erreichte Höchstgeschwindigkeit bei den Vergleichsstrategien,
- $N(x)$ = Nutzenpunkte für den Höchstgeschwindigkeitswert x der Investitionsstrategie

Dieser Nutzenfunktion liegt die Annahme zugrunde, dass insbesondere leicht oberhalb der Minimalanforderung liegende maximal zulässige Höchstgeschwindigkeiten einen höheren Mehrnutzen schaffen als Maximalgeschwindigkeiten weit oberhalb der geforderten Mindeststreckengeschwindigkeit, da solch hohe Geschwindigkeiten aufgrund der Streckenbeschaffenheit etc. in der Regel seltener gefahren werden können bzw. in Zukunft abgefragt werden.

4. Die Möglichkeit der „Zuglaufverfolgung“ besteht nur bei Einsatz eines ESTW. Entsprechend erhalten der Zugleitbetrieb ohne technische Unterstützung und das Zugmeldeverfahren mit MSTW die niedrigste Punktzahl 1, die beiden Verfahren mit ESTW hingegen die maximale Punktzahl 9. Es handelt sich hierbei um eine reine Ja-/Nein-Abfrage.
5. Die „Möglichkeit für Zugkreuzungen und Zugüberholungen“ ist bei Verwendung von Rückfallweichen im Zugleitbetrieb ohne technische Unterstützung stark begrenzt. Die anderen Investitionsalternativen erlauben Zugkreuzungen und -überholungen uneingeschränkt.
6. Das Qualitätskriterium „Verspätungsabbau“ wird anhand der oben beschriebenen Verspätungsfunktion [13] mit den angegebenen Parametereinstellungen messbar gemacht. Jene Investitionsalternative mit den meisten Verspätungsminuten erhält die niedrigste Punktzahl, jene mit den wenigsten Verspätungsminuten die höchste. Dabei erfolgt die Zuordnung der Verspätungsminuten mit nachfolgender, linearer Nutzenfunktion [15]. Durch die lineare Funktion wird jeder Verspätungsminute eine gleiche Bedeutung hinsichtlich der Systemqualität (Pünktlichkeit) beigemessen.

$$N(x) = \frac{1-9}{t_{\max} - t_{\min}} \times x + \frac{9 \times t_{\max} - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}} \quad [15]$$

mit:

- t_{min} = minimale Anzahl an Verspätungsminuten bei den Vergleichsstrategien,
- t_{max} = maximale Anzahl an Verspätungsminuten bei den Vergleichsstrategien,
- $N(x)$ = Nutzenpunkte für die Verspätungsminuten x bei der Investitionsstrategie

Im Zugmeldeverfahren mit ESTW erfolgt der Verspätungsabbau am besten, mit dem Zugleitbetrieb ohne technische Unterstützung kann am schlechtesten auf die Verspätungen reagiert werden. Dieses Kriterium wird im Rahmen der Nutzwertbetrachtung bewertet, da eine Erfassung der durch Verspätungen verursachten Betriebserschwerungskosten hier nicht erfolgen kann. Denn die Störszenarien sind fiktiv und führen damit nicht zwingend zu Kosten im eigentlichen Betrieb. Im Gegenzug wird Nichtverfügbarkeit bei der Bewertung von Instandhaltungsstrategien berücksichtigt. Hier stellen sie eine wesentliche, zu messende Erfolgsgröße der einzelnen Instandhaltungsstrategien dar. (siehe hierzu Abschnitt 6.3).

7. Wie einfach auf gegebenenfalls notwendige Streckenänderungen mit den vier Alternativen reagiert werden kann, wird unter dem Nutzenkriterium „*Flexibilität bei baulicher Umgestaltung des Bahnhofs*“ bewertet. Ohne Zweifel sind Änderungen im Zugmeldeverfahren mit ESTW möglich, jedoch ist die Software komplex. Daher bedarf es umfangreicher Kenntnisse und Anpassungen. Anders dagegen beim Zugleitbetrieb mit ESTW. Hier ist die Software weniger umfangreich und damit leichter anzupassen. Beim Zugleitbetrieb ohne technische Unterstützung können Umgestaltungen nur mit Hilfe eines lokalen Stellwerks oder zusätzlichem Personal vorgenommen werden.
8. Für die Bewertung des Nutzenkriteriums „*Störungsmanagement*“ gilt, dass infrastrukturelle Störungen bei einer dezentralen Betriebsführung in der Regel schneller behoben werden können. Das benötigte Instandhaltungspersonal ist schneller vor Ort. Eine solche dezentrale Betriebsführung erfolgt beim Zugmeldeverfahren mit MSTW. Im Falle einer Störung werden im Zugleitbetrieb die entsprechend notwendigen Zuglaufmeldungen durchgeführt. Anders dagegen im Zugmeldebetrieb mit ESTW. Hier sind Änderungen der betrieblichen Abläufe nicht so einfach umsetzbar. Mitunter bildet ein Fahren auf Sicht die einzige Alternative bei Störungen in diesem Betriebsverfahren.
9. Das jedes der Betriebsverfahren eine eigene Leistungsfähigkeit, d. h. Anzahl Zugeinheiten je Zeiteinheit, realisieren kann, ist in der Bewertung zu berücksichtigen. Da jedoch kein unmittelbarer monetärer Nutzen damit erzielbar ist, da dies eine entsprechende Nachfrage nach einem, über den definierten Fahrplan hinausgehenden Kapazitätsbedarf voraussetzen würde, kann eine über das geforderte Zugprogramm hinausgehende Leistungsfähigkeit lediglich im Rahmen der qualitativen Nutzenbewertung erfasst werden. Dies erfolgt unter dem Nutzenaspekt „*Kapazitätsüberschuss*“. Die beiden Investitionsalternativen mit Einsatz von Zugleitern sind in ihrer bewerteten Variante am Kapazitätslimit. Für eine Kapazitätssteigerung sind für den Zugleitbetrieb mit ESTW und den Zugleitbetrieb

ohne technische Unterstützung zusätzliche Zugleiter notwendig. Entsprechend wird ihnen die niedrigste Punktzahl zugeordnet. Die beiden Investitionsvarianten mit Umsetzung des Zugmeldeverfahrens erlauben problemlos Zusatzverkehre.

Um die Erkenntnisse aus finanzanalytischer Bewertung und nutzwertanalytischer Punktebewertung angemessen in der Investitionsentscheidung einzubeziehen, sind sie zusammenzuführen und für den Entscheidungsträger aufzuarbeiten (vgl. Abbildung 10). Für das Fallbeispiel erfolgt dies wie nachfolgend beschrieben (vgl. Abschnitt 6.2.3.5).

6.2.3.5 Ergebniszusammenführung

Tabelle 5 fasst die gewonnenen Erkenntnisse aus quantitativer und qualitativer Analyse zusammen. Das hierin aufgeführte Ranking macht deutlich, dass der Ist-Zustand (A0) sowohl bei der rein monetären (ohne Betrachtung der Instandhaltungsaufwendungen) wie auch bei der nutzenorientierten Bewertung schlechter ausfällt als die Streckenumrüstung hin zu einem Zugmeldebetrieb mit ESTW (A1) bzw. einem Zugleitbetrieb mit ESTW (A2).

| Nutzwert | Referenzsystem – Zugmeldeverfahren mit MSTW (A0) | Zugmeldeverfahren mit ESTW (A1) | Zugleitbetrieb mit ESTW – ESZB (A2) | Zugleitbetrieb ohne technische Unterstützung – ZLB (A3) |
|--------------------------------|--|---------------------------------|-------------------------------------|---|
| Wirtschaftlichkeit qualitativ | 54604462 | 28947568 | 26018788 | 13946948 |
| Wirtschaftlichkeit quantitativ | 6,74 | 8,01 | 6,8 | 2,13 |

Tabelle 5: Bewertungsergebnisse Fallstudie – Teil I

| Nutzwert | Ranking der Alternativen | | | |
|--------------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|
| Wirtschaftlichkeit qualitativ | 1. A3 | 2. A2 | 3. A1 | 4. A0 |
| Wirtschaftlichkeit quantitativ | 1. A1 | 2. A2 | 3. A0 | 4. A3 |

Tabelle 6: Bewertungsergebnisse Fallstudie – Teil I

Das Nutzwertportfolio (siehe Abbildung 33) stellt ein geeignetes Mittel dar, um die Resultate aus quantitativer und qualitativer Wirtschaftlichkeitsbewertung grafisch gegenüberzustellen.

Aus Abbildung 33 wird erkennbar, dass das Zugmeldeverfahren mit ESTW und der elektronisch signalisierte Zugleitbetrieb (ESZB) ähnliche Bewertungsergebnisse erzielen. Beide Investitionsalternativen verwenden ein elektronisches Stellwerk als Kern der Zugsicherung. Das Zugmeldeverfahren verursacht über den Betrachtungshorizont von 25 Jahren etwas mehr

Kosten, erzielt im Gegenzug auch eine etwas höhere Nutzenpunktzahl als der ESZB. Ganz deutlich wird, dass der derzeitige Ausrüstungsstand (A0) diesen beiden Alternativen sowohl in monetärer wie qualitativer Sicht unterlegen ist. Dass dies so ist, insbesondere in Anbetracht dessen, dass keine Anschaffungs- und Rückbaukosten für das Ist-System anfallen, ist in erster Linie der Verwendung einer sehr personalintensiven Technik geschuldet. Diese verursacht hohe jährliche Betriebspersonalkosten. Die gewonnenen Zahlen unterstreichen die von BORMET getroffene Aussage, dass die Instandhaltungs- und Betriebskosten bis zu neun Mal höher im Vergleich zu moderner Technik sind ([Bor07], S.9).

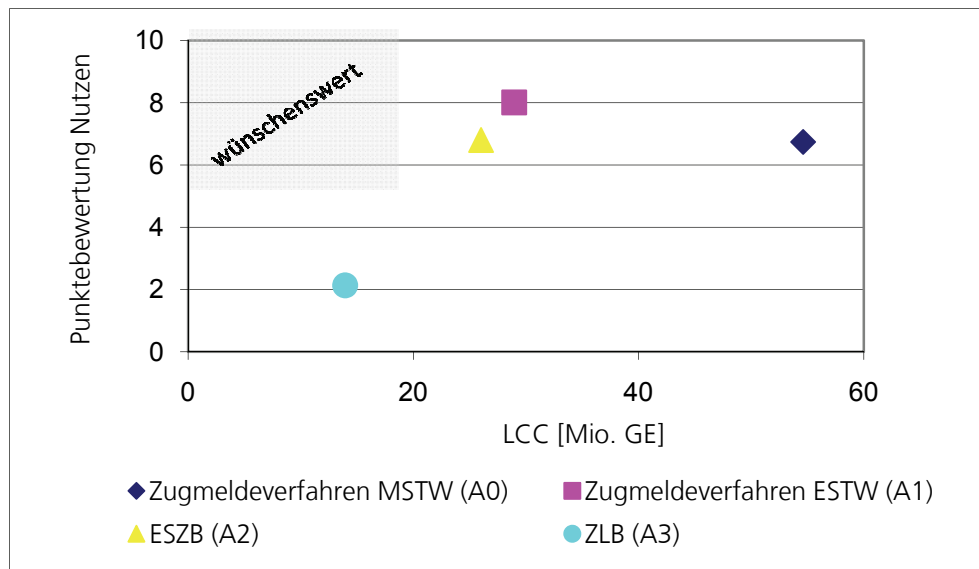


Abbildung 33: Nutzwertportfolio Fallstudie

Eine gesonderte Ergebnisanalyse bedarf es für eine Investition in den Zugleitbetrieb ohne technische Unterstützung. Ob die niedrigen LCC von rund 14 Millionen Geldeinheiten die geringe Anzahl erreichter Nutzenpunkte (Qualität) rechtfertigen, ist im Einzelfall zu prüfen. An dieser Stelle obliegt es dem Entscheider und seinen erweiterten Kenntnissen über unternehmerische Rahmenbedingungen und Zukunftsperspektiven, welche der Investitionsstrategien dem nun folgenden Schritt der Instandhaltungsstrategiebewertung unterzogen werden (vgl. Abbildung 26). Erst danach kann die endgültige Investitionsstrategieentscheidung getroffen werden. Dabei kann bereits an dieser Stelle festgehalten werden, dass der Zugleitbetrieb ohne technische Unterstützung auch nach Definition der sinnvollsten Instandhaltungsstrategie und der Berücksichtigung der zugehörigen Instandhaltungskosten die kostengünstigste Alternative bleiben wird. Dies ist durch die geringe Anzahl an instand zu haltenden Infrastrukturelementen bedingt. Dass diese Variante jedoch nicht die wirtschaftlichste darstellt, wird durch Abbildung 34 deutlich. Eine relative Darstellung von LCC je Nutzenpunkt stellt klar heraus, dass der Einsatz von ESTW aufgrund der wesentlich besseren qualitativen Bewertung aus unternehmerischer Sicht sinnvoll ist.

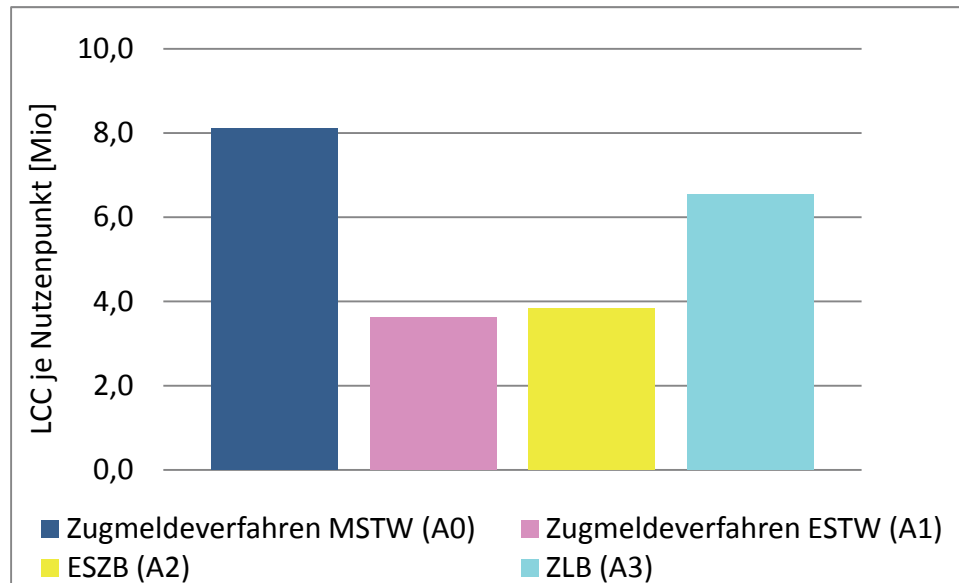


Abbildung 34: LCC je Nutzenpunkt Fallstudie

Im Falle einer generellen Entscheidung für ein hohes Qualitätsniveau, besteht die Wahl zwischen Zugmeldeverfahren mit ESTW (A1) und ESZB (A2) (vgl. sehr ähnliche LCC je Nutzenpunkt in Abbildung 34). Während beim Zugmeldeverfahren vereinzelt bessere qualitative Werte erzielt werden können, punktet der ESZB mit niedrigeren LCC bei gleichzeitig hoher betrieblicher Qualität. Deshalb ist ein zweiter Iterationsschritt denkbar, aber in Anbetracht dessen, dass den monetären Werten in der Regel eine höhere Bedeutung beigemessen wird, eher unwahrscheinlich. Denn das Zugmeldeverfahren mit ESTW und der ESZB unterscheiden sich in ihren Nutzenpunkten letztlich nur minimal, aber in ihren LCC immerhin um knapp 3 Millionen Geldeinheiten. Der ESZB wird diese Gelddifferenz nicht mit der Instandhaltung aufbrauchen, denn Art und Anzahl der Infrastrukturelemente sind bei beiden Varianten ähnlich. D.h. bezogen auf die in Abbildung 26 dargestellte Vorgehensweise gilt für das Fallbeispiel N=1. Im Falle dessen, dass die Varianten in der Art und Anzahl der Infrastrukturelemente sehr unterschiedlich gewesen wären, hätte für beide Investitionsalternativen eine detaillierte Instandhaltungsstrategieanalyse durchgeführt werden müssen. Dies ist mitunter auch sinnvoll bei Investitionsalternativen mit identischem BV und Technik aber unterschiedlichen Systemlieferanten. Eine solche Möglichkeit wird im Rahmen der Studie nicht betrachtet.

Dabei muss klar herausgestellt werden, dass die hier dargestellten Ergebnisse nur für dieses Streckenbeispiel und den hierbei getroffenen Annahmen (vgl. Abschnitt 6.2.1) gelten⁶¹. Eine verallgemeinernde Aussage über die Eignung von Investitionsalternativen darf nicht getroffen werden. Dennoch unterstreichen die Ergebnisse des ersten Bewertungsschritts der Fallstudie, dass bei einfachen betriebstechnischen Anforderungen i. d. R. die technische Lösung mit einem mittleren Automatisierungsgrad aus betriebswirtschaftlicher Sicht die geeignete Investitionsstrategie darstellt.

Noch bedeutender ist, dass die Ergebnisse der Beleg für die erste These sind (vgl. Abschnitt 5.2). Mit ihr wurde behauptet, dass die Erkenntnisse aus Eisenbahnbetriebssimulationen im

⁶¹ So werden beispielsweise in diesem Fallbeispiel keine Sensitivitätsbetrachtungen über unsichere Eingangsgrößen durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.1.1.2).

Rahmen einer Investitionsentscheidung in Bahnsicherungstechnik unbedingt zu berücksichtigen sind. Das heißt eine rein monetäre Bewertung auf Basis einer LCC-Analyse nicht ausreichend sei. Für das Fallbeispiel würde eine alleinige Verwendung der Erfolgsgröße LCC höchstwahrscheinlich zu einer Fehlentscheidung führen. (vgl. Abbildung 33) Denn bei einer Entscheidung zu Gunsten des Zugleitbetriebs ohne technische Unterstützung rein auf Basis der LCC, müssten erhebliche Defizite bei den betrieblichen Qualitätsparametern in Kauf genommen werden (vgl. Tabelle 4, Abbildung 34).

6.3 Instandhaltungsstrategiebewertung

Die Bewertung alternativer Instandhaltungsstrategien ist mitunter aufwendig, da die beschreibenden System- und Strategieparameter gewissenhaft festgelegt und im Modell hinterlegt werden müssen. Entsprechend dem Verfahrensablauf (vgl. Abbildung 26) ist die Bewertung alternativer Instandhaltungsstrategien für die zuvor ausgewählte(n) Investitionsalternative(n) (vgl. Abschnitt 6.2) gefordert. Da dies unter Berücksichtigung des gesamten beispielhaft gewählten Streckenabschnitts (vgl. Abbildung 30) und damit der Gesamtheit der jeweils vorgesehenen Infrastrukturelemente zu erfolgen hat, würde eine vollständige Bewertung an dieser Stelle zu weit führen. Zudem ermangelt es für einzelne der verbauten Bahnsicherungstechnikelemente an notwendigen Informationen hinsichtlich zeit- und belastungsabhängigen Veränderungen des Systemzustands. Denn während die Betreiber bisher nur vereinzelt Mess- und Diagnosesysteme einsetzen aus denen sich derartiges Wissen ableiten ließe, treffen die Systemhersteller ihre Aussagen zu der Systemverfügbarkeit primär basierend auf statistischen Berechnungen (vgl. [DIN08]).

Deshalb erfolgt die exemplarische Bewertung möglicher Instandhaltungsstrategien i. e. S. (vgl. Abschnitt 4.4) anhand eines sicherungstechnischen Systems. Damit wird die prinzipielle Anwendung des entwickelten Verfahrens verdeutlicht, gleichwohl kann damit die Durchführung einer Optimierung der Instandhaltungsstrategien unter dem Gesichtspunkt der örtlichen Zusammengehörigkeit von Systemen sowie eine Machbarkeitsuntersuchung auf Netzebene im Bewertungsmodell nicht verdeutlicht werden. Mögliche Effekte bezogen auf das Ziel der Kostenminimierung, die sich beispielsweise durch das Zusammenlegen von Instandhaltungsmaßnahmen (vgl. auch [HT07]) für örtlich beieinander liegende Systeme ergeben, können nicht aufgezeigt bzw. untersucht werden. Unabhängig davon liefert der Kern der Instandhaltungsstrategiebewertung - die Zustandsmodellierung - die für die Investitionsempfehlung wichtigsten Erkenntnisse. Wie in Abschnitt 0 beschrieben, wird bisher lediglich ein bahnsicherungstechnisches System in seinem Zustand umfassend überwacht. Damit liegen auch nur für dieses System aussagekräftige Daten aus der Praxis vor und die Auswahl eines geeigneten Untersuchungsgegenstandes ist einfach. Wie die Evaluierung von Instandhaltungsstrategien für Bahnsicherungstechnik erfolgt, soll deshalb anhand des Systems Weiche (siehe Abbildung 37) erläutert werden. Dies ist auch aus Sicht der hohen Kostenrelevanz von Weichen legitim

[SL03]. Weichen stellen einen Infrastrukturkostentreiber dar [Sta01] [UIC02b] und verursachen einen hohen Anteil von Betriebsstörungen ([UIC02a], S. 75 ff.).⁶²

In dem nun folgenden Abschnitt 6.3.1 werden kurz die Rolle der Eisenbahnweiche und die Funktionsweise der sie zustandsbeschreibenden Diagnosesysteme beschrieben. Dies schafft die Grundlage für die Zustandsmodellierung. Mit diesen Hintergrundinformationen kann die eigentliche Bewertung der ausgewählten Instandhaltungsstrategien erfolgen (vgl. Abschnitte 6.3.2 und 6.3.3)

6.3.1 Das System Eisenbahnweiche

Dieser folgende Abschnitt untergliedert sich entsprechend Abbildung 35 und hat aufbauend auf den Kenntnissen von System und Verhalten die Zustandsmodellierung mittels Zustandsfunktion zum Ziel.

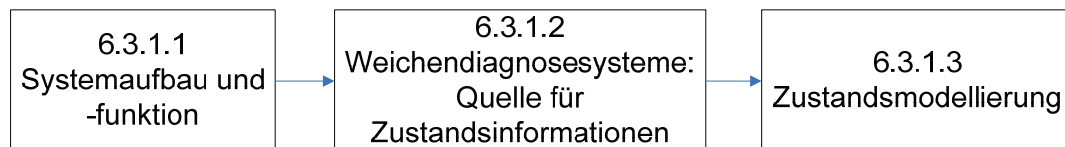


Abbildung 35: Struktur Abschnitt 6.3.1

6.3.1.1 Aufbau und Funktion

Der Weichenantrieb (siehe Abbildung 36) ist ein wesentlicher Bestandteil der Weichenstellvorrichtung und ermöglicht gemeinsam mit dem Weichenoberbau, der sich aus Herzstück, Weichenzunge, Weichenschwelle und Fahrschiene mit Radlenker zusammensetzt (vgl. Abbildung 37), den Gleiswechsel eines Zuges, ohne eine Fahrtunterbrechung notwendig zu machen [BH86].

⁶² Offen bleibt an dieser Stelle die Instandhaltungsstrategiebewertung für die anderen in der Investitionsstrategie vorgesehenen Sicherungssysteme (Signale, Achszähler, Gleisstromkreise, Gleismagnete, Signaltafeln) (vgl. Abschnitt 6.2.2.2). Dies müsste analog zum System Weiche erfolgen. Dieser Umstand schließt eine Netzbewertung der Instandhaltungsstrategien aus, d. h. eine Überprüfung der Instandhaltungsstrategien der einzelnen Systeme auf ihre Wirtschaftlichkeit im Netzverbund. Die grundlegenden dafür notwendigen Schritte sind in [BBK+08] und [Rud08] beschrieben.



Abbildung 36: Weichenantrieb S700K [Sie08]

Mit ihrer Funktion spielen Weichen eine wesentliche Rolle in der Systemflexibilität und verlangen nach regelmäßigen Zustandskontrollen, um eine hohe Verfügbarkeit sicherstellen zu können. Entsprechend hat die Art und Weise der Weicheninstandhaltung einen hohen betrieblichen und wirtschaftlichen Stellenwert.

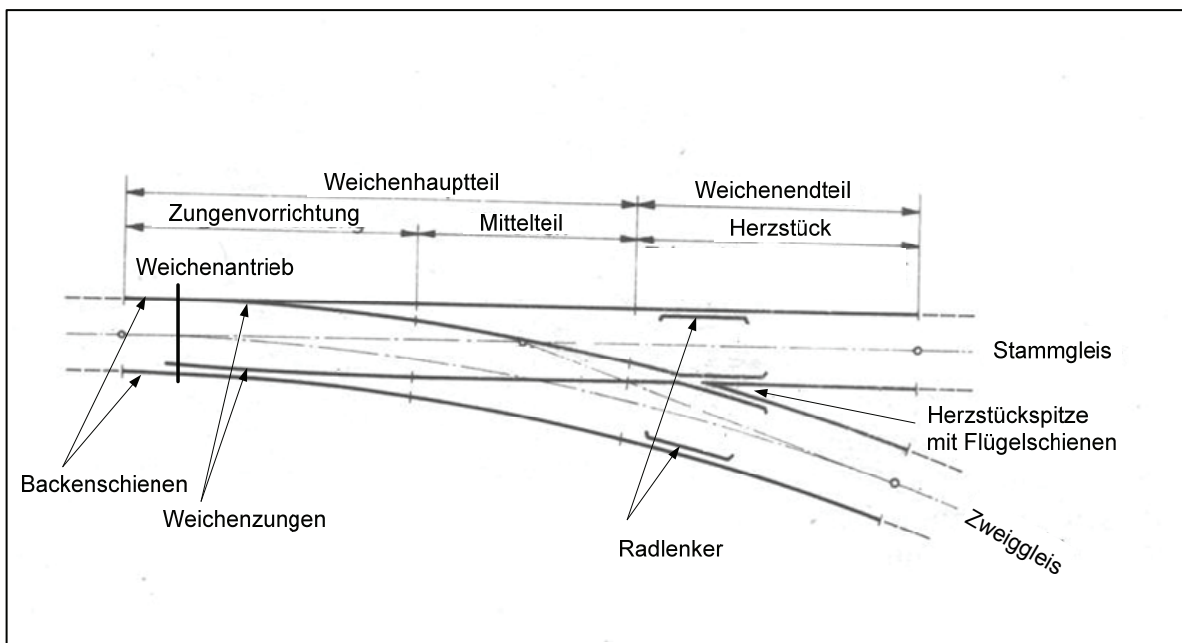


Abbildung 37: System Weiche (in Anlehnung an [BH86], S. 10)

Für die Definition und Bewertung von Instandhaltungsstrategien (vgl. Kapitel 4) ist das Wissen über dessen Schädigungsverhalten neben Kenntnissen zu Aufbau und Funktionsweise des Untersuchungsgegenstands unabdingbar. Denn wie ADAM zu Recht festhält, ist das Wissen über den technischen Zustand Voraussetzung für eine effizientere Instandhaltung ([Ada89], S. 100). Die das Schädigungsverhalten vorrangig bestimmenden Faktoren können prinzipiell in Umwelteinwirkungen (Klima, Temperatur) und wirkende mechanische (Reibung, Schlupf) und chemische Prozesse (Korrosion) unterschieden werden ([BH86], S. 138 ff.). Eine genaue Aufstellung der Ursachen für die Weichenabnutzung findet sich in der von der UIC

beauftragten Studie EcoSwitch. Daraus geht hervor, dass den Umwelteinwirkungen lediglich ein langfristiger Einfluss auf den Weichenzustand zuzuschreiben ist. Vielmehr spielen die Anzahl und das Gewicht der verkehrenden Züge sowie deren Geschwindigkeit und die Qualität des Unterbaus eine wichtige Rolle. [Zwa09] Für die Abnutzung des Weichenantriebs ist im Besonderen die Anzahl der Umstellvorgänge relevant. ([UIC02a], S. 30 ff.). Einen Überblick denkbarer Einflussgrößen zeigt Abbildung 38.

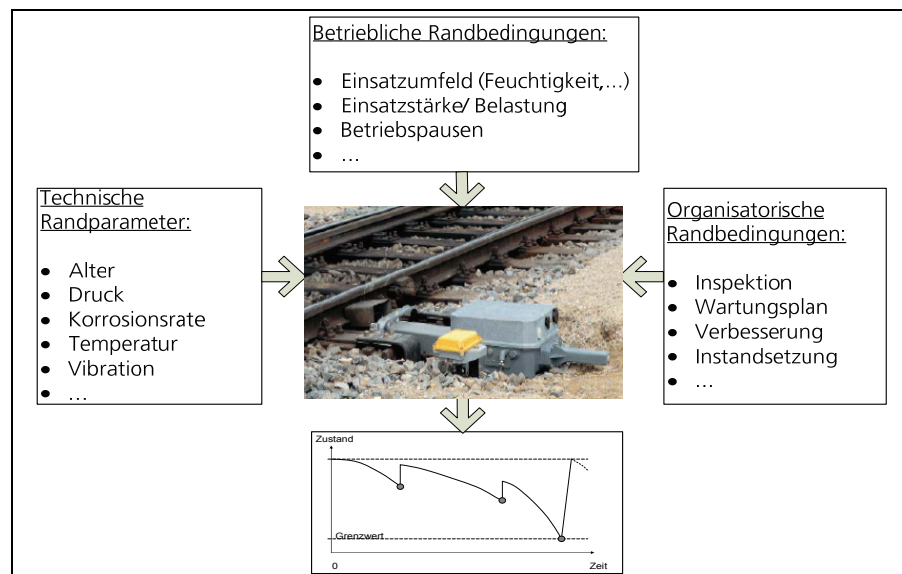


Abbildung 38: Einflussgrößen auf den Systemzustand

6.3.1.2 Weichendiagnosesysteme

Die Daten aus dem Einsatz von Weichendiagnosesystemen bilden im Folgenden die Grundlage für die Strategiemodellierung und -bewertung. Damit muss jedoch die strikte Trennung zwischen Sicherungstechnik und Oberbau aufgegeben werden. Denn die Weichendiagnosesysteme überwachen sowohl den Zustand von Antrieb (Sicherungstechnik) als auch den der Weichenkonstruktion im Gleisbett (Oberbau) ([Sto02], S. 27 f.). Das Diagnoseprinzip von Weichen beruht bei allen Systemanbietern auf der Proportionalität zwischen abgegebener Kraft des Motors zu aufgenommener Wirkleistung des Motors (vgl. Abbildung 39). Das Diagnosesystem misst dazu den zeitlichen Verlauf von Stellspannung und -strom während des Weichenumlaufs. Aus diesen Spannungs- und Stromwerten wird vom Diagnosesystem eine Wirkleistungskurve in Abhängigkeit von der Zeit errechnet. Aus dem damit berechneten Kurvenverlauf, der den Ist-Zustand der Weiche abbildet, können bereits vorhandene oder sich abzeichnende Weichenmängel abgeleitet werden. Hierbei unterstützend wirken systeminterne Auswertemodule, mittels derer wichtige Kennwerte zur Zustandsbeurteilung aus dem Umstellvorgang ermittelt werden. Diese Kennwerte werden mit den zeitfensterspezifischen Wirkleistungsgrenzwerten verglichen, wobei die Grenzwerte in Abhängigkeit vom Weichentyp, Verschlussyp und Weichenantriebstyp definiert sind. [Sie98b] In Abbildung 39 ist der zeitliche Verlauf der Wirkleistung eines Weichenantriebsmotors dargestellt. Außerdem sind die definierten Zeitfenster (horizontale Linien) hinterlegt sowie beispielhaft der Grenzwertbereich für

den Parameter Zungenschwergang skizziert. Ergibt der Abgleich eine Überschreitung des Grenzwertbereichs (vgl. Abbildung 40) wird eine Warnmeldung ausgegeben. [Sto02]

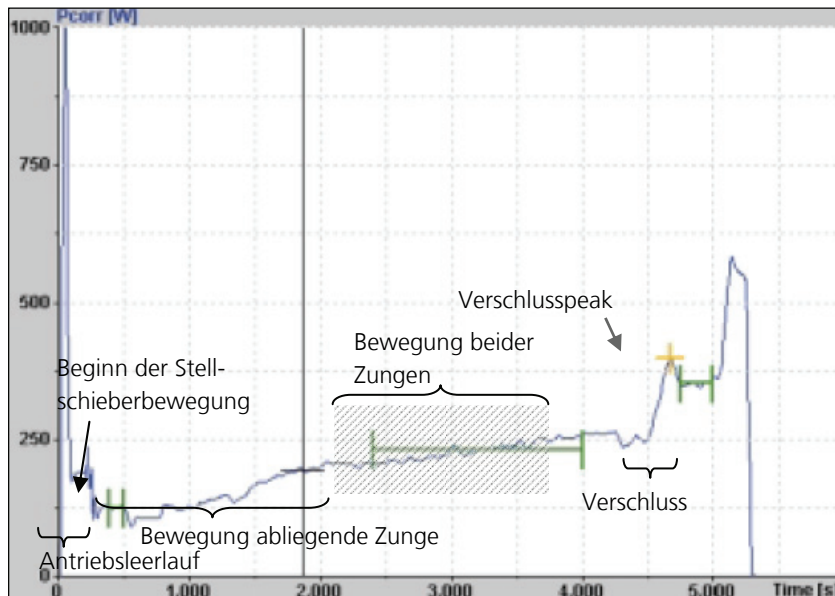


Abbildung 39: Wirkleistungskurve eines Weichenantriebsmotors [Sto02]

Neben dem in Abbildung 39 gekennzeichneten Bereich für das Zustandskriterium Zungenschwergang können noch weitere Kriterien zur Zustandsdiagnose bestimmt werden. Zu ihnen gehören unter anderem die Umlaufzeit, die Zungenvorspannung und der Schwergang im Verschluss.

Der Zungenschwergang ist eine aussagekräftige Zustandsgröße des Systems Weiche [Gut08] und die praktischen Erfahrungen zeigen, dass Schwierigkeiten im Umstellvorgang der Zungen einen großen Anteil an den gesamten Weichenstörungen darstellen. Entsprechend bildet der Zungenschwergang die Basis für die nachfolgend beschriebene Instandhaltungsstrategiebewertung und der dazu notwendigen in Abschnitt 6.3.1.3 erläuterten Zustandsmodellierung.

Um eine Bewertung der Instandhaltungsstrategien zu ermöglichen, ist ausgehend von Messreihen eine zustandsbeschreibende Funktion zu ermitteln. Wichtig dafür ist die Kenntnis über den zeitlichen Verlauf der Wirkleistung bei der Bewegung beider Zungen innerhalb eines Umstellvorgangs. Dieser ($P_{\text{beide Zungen lauf}}$) ist zusammen mit den Grenzwertbereichen und den Warnstufen 1 und 2 bezogen auf den gesamten Umstellvorgang schematisch in Abbildung 40 dargestellt. Dabei ist der tatsächliche Verlauf abhängig von den Einsatzbedingungen (Anzahl und Art der Züge etc.) und dem Weichentyp. Ist die maximale Wirkleistung im Zeitfenster kleiner der Leerlaufleistung plus 50 Prozent der Differenz aus maximalem Leistungspick und der Leerlaufleistung, so ist das Messergebnis in Ordnung (grüner Bereich). Anders verhält es sich, wenn die maximale Wirkleistung höher ausfällt. Je nachdem liefert das Diagnosesystem eine erste (gelb) oder akute (rot) Störmeldung an den Instandhaltungsmanager. Dabei be-

stimmen sich die Grenzen durch den Weichentyp und liegen somit nicht konstant zwischen 50 und 75 Prozent (siehe Abbildung 40).

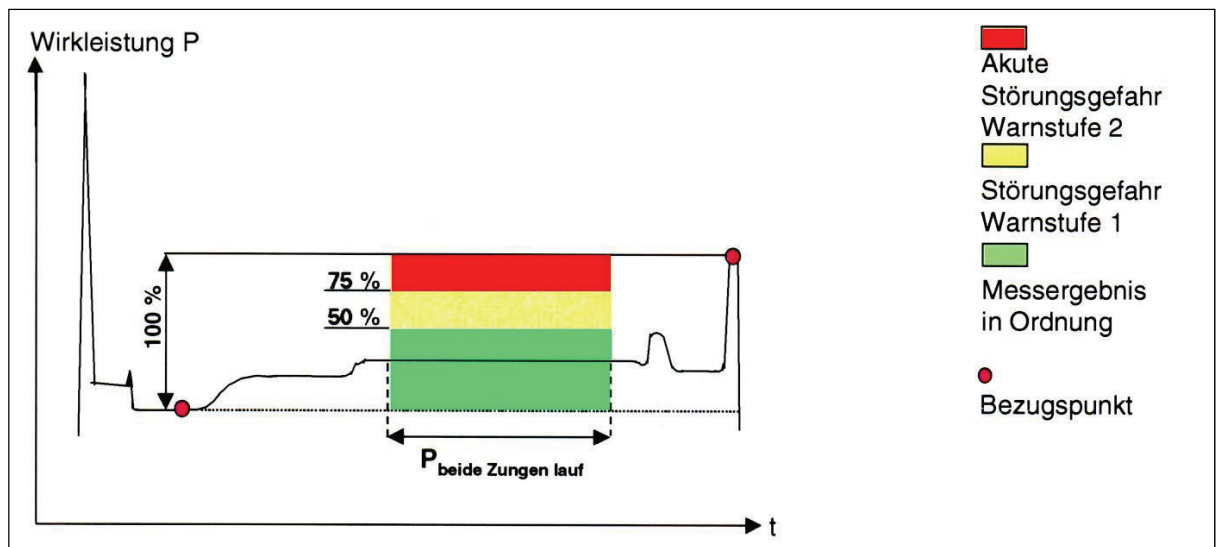


Abbildung 40: Grafische Darstellung der Grenzwertbereiche für das Zustandskriterium Zungenschwergang [Sie98b]

Prinzipiell gilt, dass je länger eine Weiche im Einsatz ist und damit je höher die Anzahl erfolgreicher Umstellvorgänge, desto höher ist die benötigte Motorleistung für das Umstellen der Weichenzungen. Wird eine der Warnstufen überschritten, liefert das System Meldungen, nach denen geeignete Instandhaltungsmaßnahmen ausgelöst werden und damit der Systemzustand verbessert wird, d. h. die benötigte Motorleistung für den Umstellvorgang wieder sinkt.

6.3.1.3 Zustandsmodellierung

Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 6.3.1.2 wird der in Abbildung 39 exemplarisch dargestellte Grenzwertbereich für den Zustandsparameter Zungenschwergang (Bewegung beider Zungen) für die Zustandsmodellierung genutzt.

Bei den nachfolgenden Analysen werden entsprechend den praktischen Erfahrungen die Umstellvorgänge als die determinierende Größe betrachtet [Gut08]. Durch sie und weniger durch die Liege- oder Betriebszeit einer Weiche bestimmt sich die Abnutzung des Systems ([UIC02a], S. 30 ff.).

Bei der Art und Weise der Zustandsbeschreibung und -modellierung können entweder Messreihen aus einer Vielzahl von technischen Versuchen (z. B. Belastungstests) an den identifizierten kritischen Einheiten des Systems die Grundlage bilden. Die andere Möglichkeit liegt in der statistischen Auswertung von Messreihen aus dem praktischen Einsatz der Systeme. (vgl. Abschnitt 4.7.3) In der Fallstudie wird letzteres gemacht. Die Datenanalyse soll zunächst umrissen werden. Im Anschluss erfolgt die Ermittlung eines zu erwartenden Zustandsverlaufs für eine Weiche im hier betrachteten Untersuchungsraum (Abschnitt 6.1). Für die Analyse werden die Informationen aus dem Einsatz eines SIDIS W® Systems im Großraum Berlin verwendet.

Dabei handelt es sich um Messreihen zu elektronischen Weichen mit und ohne Zungenrollvorrichtung (ZRV) (siehe Anhang E.1). Die untersuchten Messreihen umfassen einen Einsatzzeitraum von einem Jahr. Die Anzahl der Umstellvorgänge und damit der Messungen je Tag variieren je nach Einsatzintensität der Weichen. Alle untersuchten Weichen können den normal belasteten Weichen zugeordnet werden.⁶³

Bei der Auswertung der Messreihen wird beachtet, dass

- das Leistungsverhalten normalerweise bei Rechts- und Linkslauf unterschiedlich ist; die Messergebnisse werden deshalb getrennt nach Umlaufrichtung analysiert. Die sensible Umstellrichtung bildet die Grundlage der Zustandsbeschreibung und damit der Instandhaltungsstrategiebewertung.
- die Messdaten von Weichenstellvorgängen in ihrem Verlauf weichentyp- und antriebstypspezifisch sind sowie von den Einsatzbedingungen abhängen (vgl. Abbildung 38). Deshalb wird die Annahme getroffen, dass im betrachteten Netz die gleichen Weichen⁶⁴ verbaut werden sowie gleiche Einsatzbedingungen gelten.

Die benannten beiden Aspekte bilden die Randbedingungen für die Aufstellung der Zustandsgleichung (siehe Formel [16]). Dazu werden Informationen zu Wirkleistung und Anzahl an Umstellvorgängen in Relation zu Art und Zeitpunkt erfolgter Instandhaltungsmaßnahmen gesetzt. Die Analysen erbringen folgende wichtige Erkenntnisse, die bei der Zustandsmodellierung Berücksichtigung finden.

1. Die Messdaten belegen eindeutig, dass eine Eisenbahnweiche eine sukzessive Schädigung erfährt. Diese drückt sich in Form einer mit der Anzahl an Umstellvorgängen steigenden Wirkleistung aus (vgl. Anhang E.1).
2. Erwartungsgemäß gibt es in Abhängigkeit vom Vorhandensein einer ZRV Unterschiede in der Schädigung der Weichen und somit in der Zustandsgleichung selbst.⁶⁵ Für dieses Fallbeispiel bilden die Zustandsinformationen aus Messreihen von Weichen ohne Zungenrollvorrichtung die Grundlage, denn ZRV werden bevorzugt bei Weichen mit vielen Umstellvorgängen eingebaut. Für das hier zugrundeliegende Beispiel einer Investition in Infrastruktur auf einer Nebenstrecke trifft dies weniger zu.
3. Die Messwerte belegen den Unterschied in der aufzubringenden Motorleistung in Abhängigkeit von der Umstellrichtung. Bei den beiden Weichen ohne ZRV ist der benötigte Kraftaufwand in Linksrichtung niedriger; begründet ist dies durch die Lage im Gleisbett [Gut08].⁶⁶ Entsprechend formuliert die Zustandsgleichung im Rechtslauf bei diesen

⁶³ Die Anzahl der Umstellvorgänge je Tag betragen zwischen 10 und 25. Die untersuchten Weichen befanden sich bereits vor dem Überwachungszeitraum, den die Messreihe beschreibt, im Einsatz. Die weichenspezifische Historie (Liegedauer, Summe Umstellvorgänge etc.) wird nicht untersucht.

⁶⁴ Rückfallweichen müssen entsprechend der Erkenntnisse der Investitionsstrategiebewertung nicht weiter berücksichtigt werden.

⁶⁵ Dabei sind die Messdaten getrennt nach Umlaufrichtung ausgewertet und dargestellt. Weiche 302 besitzt eine ZRV. Ihre Schädigung in Abhängigkeit der erfolgten Anzahl Umstellungen nach letztmalig erfolgter Instandhaltung verläuft flacher als bei den beiden Weichen 328 und 332, die keine ZRV besitzen.

⁶⁶ Trotz ihres gleichen technischen Aufbaus unterscheiden sich die beiden Weichen ohne ZRV in ihrer Abnutzung. Die genauen Ursachen hierfür gilt es in nachfolgenden wissenschaftlichen Untersuchungen zu bestimmen.

beiden Weichen die schnellere Abnutzung und somit die sensiblere Umstellrichtung (vgl. Anhang E.3). Für eine Instandhaltungsstrategiebewertung dient diese als Basis.

4. Unerwartet zeigen die Messdaten, dass aktuell erfolgende zeitlich determinierte Wartungsmaßnahmen keinen bzw. einen kaum nachweisbaren Einfluss auf den Systemzustand gemessen an der Wirkleistung im Umstellvorgang nehmen. Vielmehr sind zur Systemverbesserung gesonderte Instandhaltungsmaßnahmen notwendig, die anhand der Meldungen des Diagnosesystems durch den verantwortlichen Mitarbeiter ausgelöst werden.

Die vom Diagnosesystem aufgezeichneten Messwerte (vgl. Anhang E.1) ermöglichen, unter Kenntnis der ermittelten Zusammenhänge zwischen Messwert, Umstellvorgang und Instandhaltungsmaßnahme, die Aufstellung einer Zustandsgleichung wie es in Anhang E.2 beschrieben wird. Die Verläufe der aus den Messreihen mittels Polynom-Interpolation gewonnenen Zustandsgleichungen sind in Abbildung 41 dargestellt.

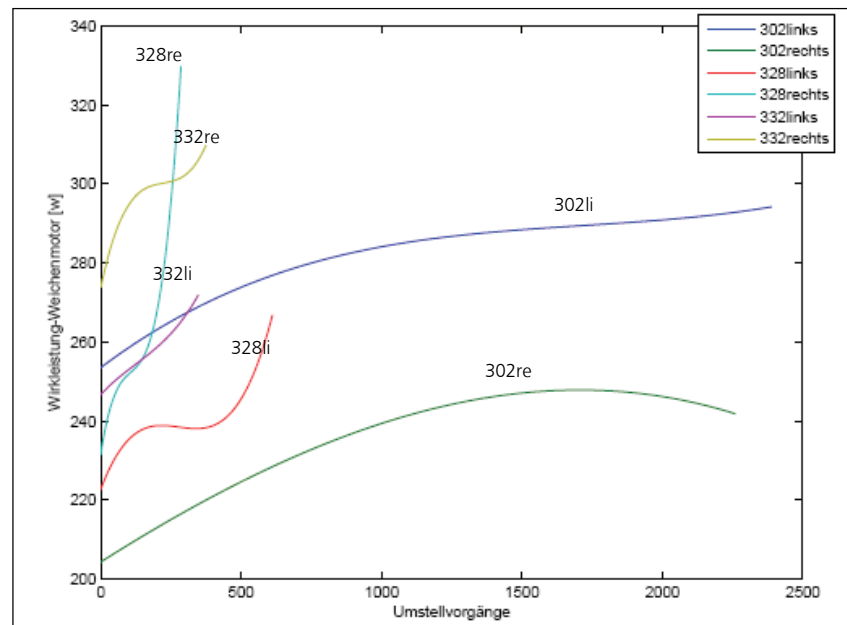


Abbildung 41: Zustandsgleichungen dreier Weichen

Für die ausgewählte Beispielweiche lässt sich das Zustandsverhalten anhand Formel [16] beschreiben. Der dazugehörige grafische Verlauf ist in Anhang E.3 dargestellt.

$$W(x) = 0,000012x^3 - 0,0037x^2 + 0,459x + 231,5. \quad [16]$$

mit

x – Anzahl der Umläufe.

Formel [16] ermöglicht damit die Abschätzung des Abnutzungsverhaltens und den in Abhängigkeit der Instandhaltungsstrategie erfolgenden Instandhaltungskosten. Sie bildet

somit die Grundlage für die nachfolgende Instandhaltungsstrategiebewertung (vgl. Abschnitt 6.3.3). Mögliche kleinere Abweichungen des tatsächlichen Abnutzungsverhaltens gegenüber dem modellierten sind dabei für eine Strategiebewertung zum Investitionszeitpunkt akzeptabel (vgl. Abschnitt 4.7).

Um eine Instandhaltungsstrategiebewertung vornehmen zu können, ist neben der Kenntnis des Zustandsverhaltens die Bestimmung der relevanten Instandhaltungs-strategien unverzichtbar. Diese sind dann mit ihren Randparametern (Zyklen, Grenzwerte etc.) zu hinterlegen (vgl. Abbildung 26). Die dafür notwendigen Informationen werden mit dem nachfolgenden Abschnitt 6.3.2 für das Fallbeispiel identifiziert.

6.3.2 Definition von Instandhaltungsstrategien

Abgeleitet aus der in Abbildung 20 dargestellten Entscheidungsabfolge werden folgende Instandhaltungsstrategien für den Untersuchungsgegenstand Eisenbahnweiche bewertet.

1. zeitabhängige Instandhaltung mit Inspektion
2. zustandsabhängige Instandhaltung
3. ausfallorientierte Instandhaltung

Zeitabhängige Instandhaltung

Die Definition und Bewertung der zeitabhängigen Instandhaltungsstrategie mit regelmäßigen Inspektionen spiegelt die jahrelange Praxis für das System Eisenbahnweiche wider und ist mit ihren Maßnahmen in der Konzernrichtlinie 892 festgehalten [Fri09]. Hiernach erfolgen kleine Wartungsmaßnahmen in zyklischen Abständen. Zusätzlich wird bei jedem Instandhaltungseinsatz eine Systeminspektion vorgenommen, deren Ergebnis je nach Systemzustand zusätzliche Instandhaltungsmaßnahmen auslöst. Erfolgt trotz kritischem Zustandsbereich aufgrund der festgelegten Zyklen keine Inspektion und werden dadurch vorhersehbare Ausfälle nicht rechtzeitig erkannt und vermieden, treten in der zeitabhängigen Instandhaltungsstrategie neben den präventiven Instandhaltungsmaßnahmen auch rein zustandsbedingte Störfälle auf. Daneben können wie bei jeder anderen Instandhaltungsstrategie korrektive Instandhaltungsmaßnahmen nach zufälligen Ausfällen (Unwetterschäden, Sabotage, Systemfehler) notwendig werden (vgl. Abschnitt 5.3.2). Dabei wird für die Strategiebewertung angenommen, dass die Behebungen dieser vorhersehbaren und zufälligen Ausfälle, entgegen den präventiven Instandhaltungsmaßnahmen, den Betriebsablauf stören und somit Betriebserschwerungskosten verursachen. Zusammengefasst werden die zeitabhängige Instandhaltungsstrategie und die durch sie verursachten Kosten durch folgende zwei Aspekte beschrieben:

- Auslöser für präventive Instandhaltungsmaßnahmen: Zeit und Zustand,
- Auslöser für korrektive Instandhaltungsmaßnahmen: absehbar in Abhängigkeit vom Zustand (systembedingt) und zufällig.

Zustandsabhängige Instandhaltung

Mit der Abbildung der zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie können die wirtschaftlichen Potentiale einer rein auf den Erkenntnissen aus zustandsüberwachenden Systemen/ Diagnosesystemen basierenden Instandhaltung simulativ bewertet werden. Für die Modellierung und Bewertung gilt, dass zusätzlich zu zustandsabhängigen präventiven Maßnahmen Instandsetzungen als Folge zufälliger Ausfälle notwendig sind. Die Simulation dieser Strategie fußt in Anlehnung auf die Ausführungen in Abschnitt 5.3.2 auf den folgenden zwei Säulen:

- Auslöser für präventive Instandhaltungsmaßnahmen: Zustand,
- Auslöser für korrektive Instandhaltungsmaßnahmen: Zufall.

Entsprechend dem praktischen Einsatz des Weichendiagnosesystems wird bei der Bewertung dieser Strategie eine kontinuierliche Zustandsabfrage (vgl. Abschnitt 4.4.2) nachgebildet.

Ausfallorientierte Instandhaltung

Bei einer ausfallorientierten Instandhaltung werden keine präventiven Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt. Ist der hinterlegte Grenzwert des Zustandsparameters erreicht, fällt das System aus. Eine Entstörung ist notwendig und wird entsprechend im Simulationsmodell ausgelöst. Der Grenzwert ergibt sich aus den Auswerteergebnissen der Messreihen. Daneben besteht analog zu den Präventivstrategien die Möglichkeit zufälliger Ausfälle. Dabei gilt, dass sowohl bei Ausfällen nach Grenzwertüberschreitungen als auch zufälligen Ausfällen BEK anfallen. Zusammengefasst gilt somit für die Simulation und Bewertung dieser Strategie:

- Auslöser für präventive Instandhaltungsmaßnahmen: keine,
- Auslöser für korrektive Instandhaltungsmaßnahmen: absehbar in Abhängigkeit vom Zustand (systembedingt) und zufällig.

Neben der monetären Bewertung anhand der Instandhaltungskosten wird durch die Abbildung von Zeitpunkt und Auswirkung der Instandhaltungsmaßnahmen auf den Zustand der Betrachtungseinheit deutlich gemacht, wie effizient die einzelnen Strategien arbeiten. So lässt sich bspw. folgende Aussage treffen. Treten über den Betrachtungszeitraum kaum Ausfälle auf und liegt der Zustandsparameter vorwiegend nahe dem Bestwert (hier 231,5 Watt [16]), lässt dies auf einen erhöhten, nicht genutzten Abnutzungsvorrat und somit auf Effizienzverluste (vgl. Abbildung 18) schließen. Zusätzlich verschafft die Gegenüberstellung von ausfallorientierter und präventiver Instandhaltung dem Entscheidungsträger ein besseres Bild von der unternehmerischen Relevanz des Systems im Unternehmens-/ Betriebsprozess. Je teurer eine ausfallorientierte Instandhaltung im Vergleich zu regelmäßigen präventiven Instandhaltungsmaßnahmen ausfällt, desto wichtiger ist die Betriebsbereitschaft (Verfügbarkeit) der Betrachtungseinheit (vgl. hierzu [Vol03], S. 85 ff.).

Wie und mit welchen konkreten Werten die drei alternativen Instandhaltungsstrategien im Modell zu hinterlegen sind, ist in Abschnitt 6.3.3 beschrieben. Sie werden basierend auf der Zustandsgleichung (vgl. Formel [16]) und den in Abschnitt 4.7 erarbeiteten Zusammenhängen (siehe Abbildung 22) simuliert und bewertet.

6.3.3 Simulation und Bewertung

Die Modellierung der Instandhaltungsstrategien für das Anwendungsbeispiel beruht auf den Erfahrungen und den von der DB Netz AG zur Verfügung gestellten Messreihen aus dem praktischen Einsatz des Verfahrens der Zustandsüberwachung (vgl. Abschnitt 6.3.1.3).

6.3.3.1 Schrittfolge Instandhaltungsstrategiebewertung

Analog zu der in Abschnitt 5.4 beschriebenen Reihenfolge der Arbeitsschritte in der Instandhaltungsstrategiebewertung, sind die für das Fallbeispiel geltenden Randbedingungen zu beschreiben. Abbildung 42 dient als Orientierung in der beispielhaften Bewertung.

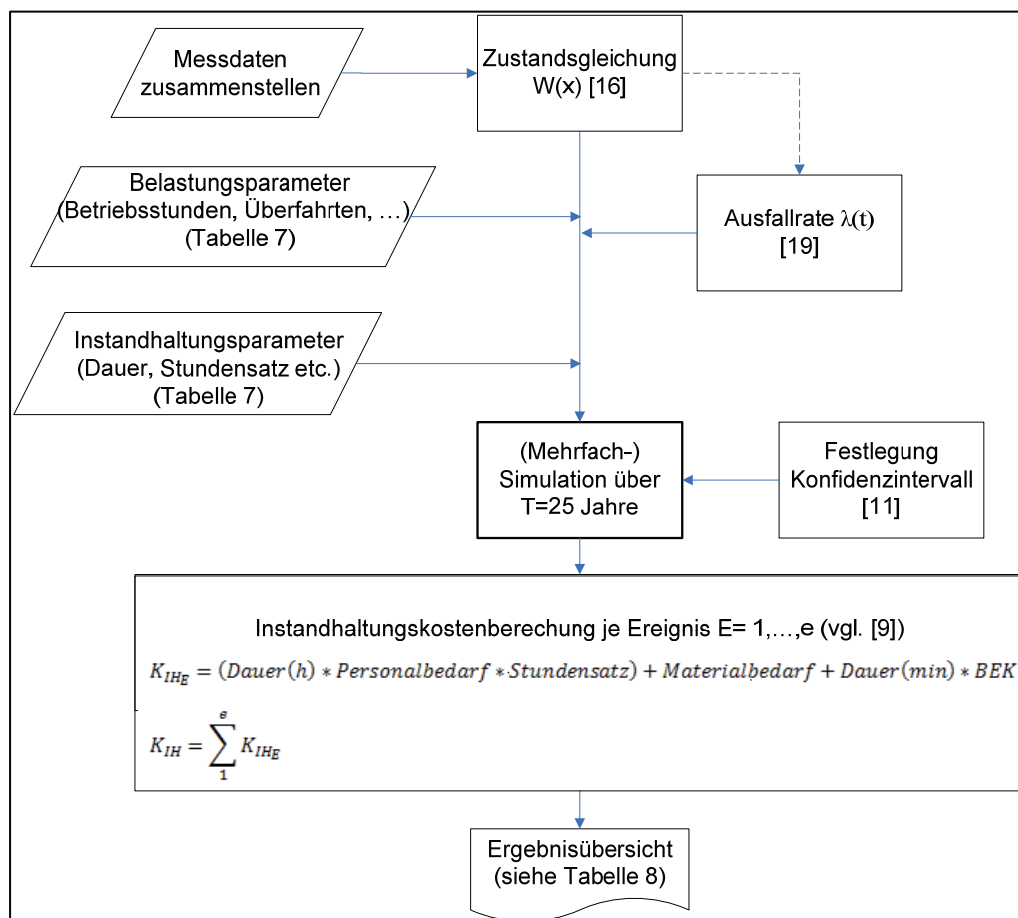


Abbildung 42: Schrittfolge Instandhaltungsstrategiebewertung - angewandt

Nach erfolgter Zustandsmodellierung und Aufstellung der Zustandsgleichung (vgl. Abschnitt 6.3.1.3) sind die Basisinformationen zusammenzutragen (vgl. Abschnitt 6.3.3.2), die Ausfallrate zu bestimmen (vgl. Abschnitt 6.3.3.3) und zur Sicherstellung verlässlicher Aussagen Mehrfachsimulationen (hier: 25-Mal) durchzuführen (vgl. Abschnitt 6.3.3.4), um abschließend anhand der Instandhaltungskosten ein Bewertungsergebnis zu erzielen (vgl. Abschnitt 6.3.3.5). Mit Abbildung 42 wird eine Einordnung der einzelnen Schritte und (Zwischen-)Ergebnisse, wie sie nachfolgend erarbeitet werden, in den Gesamtprozess gegeben.

6.3.3.2 Belastungs- und Instandhaltungsinformationen

Bei der Strategiemonellierung, -simulation und -bewertung sind in einem ersten Schritt alle für die Nachbildung der Prozesse notwendigen Informationen zusammenzutragen (vgl. Abbildung 26, „Strategieabbildung“). Diese sind für das System Weiche:

- Zustandsverhalten (in Abhängigkeit von der Zeit und Belastung) (vgl. Formel [16]),
- Systembelastung (Anzahl Stellvorgänge je Zeiteinheit),
- Zyklen der Wartungsmaßnahmen,
- Personalbedarf je Wartungsmaßnahme bzw. Instandsetzung,
- Materialbedarf je Wartungsmaßnahme bzw. Instandsetzung,
- Grenzwerte für zustandsabhängige präventive Maßnahmen sowie für Ausfälle
- Dauer je Wartungsmaßnahme bzw. Instandsetzung⁶⁷,
- Zustandsverbesserung in Abhängigkeit von den Instandhaltungsmaßnahmen (Wartung, Entstörung, Austausch).

Zustandsgleichung, die Anzahl der Umstellvorgänge und der Einfluss von Instandhaltungsmaßnahmen auf den Zustand sowie maßnahmenauslösende Grenzwerte werden mittels der Auswertungen der Messreihen gewonnen (vgl. Abschnitt 6.3.1.3). Fixe Größen wie Personal-, Zeit- und Materialbedarf nach KoRil 892 hingegen sind bei den Verantwortlichen zu erfragen. [Gut08]

Die so ermittelten und für die Strategiebewertung notwendigen Informationen sind in der nachfolgenden Tabelle 7 für das hier untersuchte Beispielsystem zusammengetragen.

⁶⁷ Lernkurveneffekte und deren mögliche Auswirkungen auf die Instandhaltungsdauer werden nicht betrachtet.

| Randparameter | Zeitabhängige Wartung | Zustandsabhängige Wartung | Entstörung (nach Ausfall) |
|-----------------------------------|--|---------------------------------|---------------------------|
| Zustandsgleichung [[16]] | $W(x) = 0,000012x^3 - 0,0037x^2 + 0,459x + 231,5$ | | |
| Belastung | 280 Überfahrten/ Woche | | |
| Betrachtungszeitraum | 25 Jahre (1300 Wochen) | | |
| Personalbedarf | 2 | 2 | 2 |
| Dauer ⁶⁸ | 0,5 h, 3 h | 2 h | 3 h |
| Materialbedarf | - | - | - |
| Zyklus | 2 Wochen | - | - |
| Stundensatz | 40 GE | 40 GE | 40 GE |
| Betriebserschwerniskosten | 15 GE/min (nur nach Ausfall) | 15 GE/min (nur nach Ausfall) | 15 GE/min |
| Preis Diagnosesystem | - | 6000 GE/ Weiche | - |
| Maßnahme auslösender Grenzwert | 350 W, 400 W | 350 W | 400 W |
| Zustand nach Maßnahme (vgl. [16]) | Unverändert (Zeit), $W(0) = 231,5 \text{ W}$ (Zustand) | $W(0) = 231,5 \text{ W}$ | $W(0) = 231,5 \text{ W}$ |

Tabelle 7: Parameter für die Analyse der Instandhaltungsstrategien Weichenantrieb⁶⁹

Die Werte aus Tabelle 7 sind im Simulationsmodell hinterlegt und ermöglichen eine Strategiebewertung basierend auf den verursachten Kosten über den Betrachtungszeitraum. Demnach werden im Modell sowohl in der zeit- als auch der zustandsabhängigen präventiven Instandhaltungsstrategie Maßnahmen ausgelöst, wenn für den Umstellvorgang eine Motorleistung von 350 Watt und mehr erforderlich sind. Für die zeitabhängige Instandhaltung gilt jedoch, dass diese Maßnahmen nur ergriffen werden können, wenn der kritische Zustand im Rahmen einer Inspektion rechtzeitig detektiert wird. Die Messwertanalyse hat ergeben, dass bei Leistungswerten um 350 Watt in der Praxis vermehrt zusätzliche Instandhaltungsmaßnahmen ausgelöst werden und dass sich nach Erreichen der 350 Watt der Zustand des Systems Wei-

⁶⁸ In der Praxis anfallende Wegekosten werden nicht berücksichtigt, da bisher keine Lageinformationen der Systeme im Netz in die Bewertung einfließen.

⁶⁹ Belastung und Kostengrößen blieben über den gesamten Zeitraum konstant.

che erheblich schneller verschlechtert. Diesen Bereich gilt es im Systemeinsatz entsprechend zu meiden, um eine hohe Systemverfügbarkeit sicherzustellen. Entsprechend der Datenauswertungen wird bei der Untersuchung der ausfallorientierten Instandhaltungsstrategie eine Entstörung simuliert, sobald 400 Watt für den Umstellvorgang notwendig sind.⁷⁰ Da auch in der Simulation der zeitabhängigen Instandhaltungsstrategie vorhersehbare Ausfälle möglich sind (vgl. 6.3.2), ist der Grenzwert 400 Watt auch in dieser Strategiemodellierung abzubilden. Nach einer zustandsabhängigen präventiven Maßnahme als auch einer Entstörung wird in der Simulation stets wieder der Bestzustand des Systems (231,5 Watt) erreicht. Nach einer rein zeitgesteuerten Instandhaltungsmaßnahme ändert sich entsprechend den Messreihenanalysen der Zustand nicht (vgl. Abschnitt 6.3.1.3).

6.3.3.3 Bestimmung der Ausfallrate

Einer gesonderten Betrachtung bedarf es für die Simulation zufälliger Ausfälle. Obwohl externe Faktoren zunächst völlig unabhängig vom System und dessen Zustand auftreten, sind die Auswirkungen eines solchen Ereignisses auf das System tendenziell nicht losgelöst vom Systemzustand zu sehen [Gut08]. In diesen Fällen gilt, dass je schlechter der Zustand, desto stärker eine mögliche Auswirkung des zufälligen externen Ereignisses auf das System und seine Verfügbarkeit. Um dies in der Simulation zu erfassen, ist die Häufigkeit zufälliger Störungen an die Ausfallrate $\lambda(t)$ gekoppelt. Ausgelöst wird ein zufälliges Störereignis letztlich durch vom System erzeugten normalverteilten Zufallszahlen, wobei der Erwartungswert $\lambda(t)$ ist.

Entsprechend Gleichung [5] gilt für die Ausfallrate:

$$\lambda(t) = \frac{-R'(t)}{R(t)}.$$

Die Zuverlässigkeit $R(t)$ ist definiert als [4]:

$$R(t) = 1 - F(t).$$

$F(t)$ lässt sich empirisch anhand von Ausfallereignissen bestimmen (vgl. [Bir07], S.312 ff.). Die dafür notwendigen Informationen können in der benötigten Form weder vom Betreiber noch vom Hersteller zur Verfügung gestellt werden. Aufgrund der hohen Verfügbarkeitsanforderungen treten nur eine geringe Anzahl von Ausfällen während des Systemeinsatzes auf, entsprechend besitzt der Betreiber keine umfassenden Informationen zu Ausfallfunktion $F(t)$ und Ausfallwahrscheinlichkeit. Die Hersteller wiederum treffen ihre Verfügbarkeitsgarantien aufgrund der langen Lebensdauern der Systeme primär anhand statistischer Berechnungen (vgl. [DIN08]). Unabhängig davon verdeutlicht Formel [7], dass $R(t)$ und damit auch $F(t)$ mit dem aktuellen Zustand, erfasst in der Kennzahl Abnutzungsvorrat $AV(t)$, korrelieren. Um ohne Kenntnis einer Ausfallfunktion, aber unter Berücksichtigung der aktuellen Systemabnutzung, die Simulation zufälliger Ausfälle zu ermöglichen, wird folgende Annahme getroffen.

⁷⁰ Die Grenzwerte sind fixe Größen. Für den Ansatz einer Grenzwertverteilung vgl. ([Har95], S. 97 f.), ([Stu96], S. 64 ff.).

Die Zustandsänderungskurve $W(x)$ [16] bildet die Grundlage für die Ausfallfunktion $F(x)$ (vgl. Formel [2]), die analog zu $W(x)$ von der Anzahl der Umläufe und nicht von der Zeit abhängig ist. Dabei wird angenommen, dass bei $W(324) = 400$ Watt $F(x) = 1$ ist, d. h. alle Systeme bei einer Ausfallanalyse ausgefallen wären. Bei $W(0) = 231,5$ Watt gilt $F(x) = 0$, d. h. alle Systeme wären bei einer Ausfallanalyse intakt. Unter diesen Annahmen ergibt sich ausgehend von Gleichung [17] folgende Gleichung für die Zuverlässigkeit $R(x)$ [18]:

$$F(x) = f(W(x)). \quad [17]$$

$$R(x) = 1 - F(x) = 1 - \frac{0,000012x^3 - 0,0037x^2 + 0,459x}{168,5} \quad [18]$$

mit

- x – Anzahl der Umläufe; $0 \leq x \leq 324$.

Damit ergibt sich für die Ausfallrate $\lambda(t)$:

$$\lambda(x) = \frac{R'(x)}{R(x)} = \frac{-0,000000214 x^2 + 0,000044 x - 0,0027}{1 - 0,0000000712 x^3 + 0,000022 x^2 - 0,0027 x} \quad [19]$$

mit

- x – Anzahl der Umläufe; $0 \leq x \leq 324$.

In Anhang E.4 ist die Ausfallrate (Gleichung [19]) in den Grenzen 0 bis 324 dargestellt. Somit folgen die Zuverlässigkeitskenngrößen dieses Weichenbeispiels unter der hier getroffenen Annahme zu $F(x)$ der Normalverteilung (vgl. [Fis90], S. 31).

6.3.3.4 Mehrfachsimulation

Aufgrund des über Zufallszahlen generierten Ereignisses des zufälligen Ausfalls muss die Anzahl notwendiger Simulationsläufe bestimmt werden, die eine verlässliche Strategiebewertung erlaubt. Ein Mindeststichprobenumfang von 25 ergibt für alle drei Instandhaltungsstrategien eine ausreichend gute Aussagequalität. Dabei wird eine Irrtumswahrscheinlichkeit α von 0,05 zugrunde gelegt. Ausgehend von Gleichung [10] und den gewonnenen Stichprobenergebnissen ergeben sich für die drei Instandhaltungsstrategien folgende 95%-Konfidenzintervalle (gerundet, nicht diskontiert)

- zeitabhängige Instandhaltung: [2.930.740 GE; 2.937.900 GE]
- zustandsabhängige Instandhaltung: [216.816 GE; 222.417 GE]
- ausfallorientierte Instandhaltung: [3.302.745 GE; 3.302.977 GE]

Das heißt, verdeutlicht am Konfidenzintervall der zustandsabhängigen Instandhaltungsstrategie, dass in 95% der Fälle der tatsächlich zu erwartende Wert für die Instandhaltungskosten über den Betrachtungszeitraum bei einer zustandsabhängigen Instandhaltung zwischen

216.816 und 222.417 Geldeinheiten liegt. Diese Aussage ist bei einer Länge des Konfidenzintervalls von rund 6.000 GE (ohne Diskontierung) zum Zeitpunkt der Investitionsentscheidung sehr aussagekräftig. Gleiches gilt auch für die beiden anderen Konfidenzintervalle.

6.3.3.5 Strategiebewertung

Die Mehrfachsimulation der drei Instandhaltungsstrategien (jeweils 25 Durchläufe) unter den zuvor definierten Parametern (vgl. Tabelle 7) und einer Diskontierung mit dem Kalkulationszinssatz von 8 Prozent (vgl. Formel [1], Abschnitt 3.1.3) ergibt in Abhängigkeit der Instandhaltungsstrategie folgendes Ergebnis bezüglich der Gesamtaufwendungen für die Systeminstandhaltung und der Gesamtanzahl zufälliger und vorhersehbarer Ausfälle (siehe Tabelle 8). Wobei bei der zustandsabhängigen Instandhaltung ausschließlich zufällige Ausfälle und keine systembedingten Ausfälle auftreten (vgl. Abschnitt 6.3.2). Die Berechnung der Kosten je Instandhaltungsmaßnahme erfolgt entsprechend Gleichung [9]. Für die Bestimmung der Gesamtaufwendungen werden die Kosten der einzelnen Maßnahmen aufaddiert und jahresweise mit dem Kalkulationszinssatz diskontiert (vgl. Abbildung 11).

Die Strategiesimulation und -bewertung erfolgt unter folgenden Randbedingungen.

1. Ein möglicher Einfluss des durchschnittlich, im Vergleich zur zustandsabhängigen Instandhaltung schlechteren Zustands der Weiche bei zeitabhängiger Instandhaltung auf andere Systeme (bspw. Schienenfahrzeuge) wird nicht erfasst.
2. Die Belastung und die Kostengrößen (vgl. Tabelle 7) werden über den gesamten Zeitraum nicht verändert.
3. Die Instandhaltungsstrategiebewertung erfolgt ausschließlich anhand des Zustandskriteriums Schwergang. Daneben weist eine Weiche weitere Schädigungsparameter auf, die nicht mit dem Kriterium Schwergang erfasst sind und ggf. mit in die Zustandsmodellierung einzubeziehen sind. (vgl. [Zwa09])
4. Nach den Instandhaltungsmaßnahmen wird über den gesamten Betrachtungszeitraum stets wieder der Bestzustand erreicht. Dies impliziert eine unendliche Systemlebensdauer. Da dies unrealistisch ist, wird aufgrund fehlender Informationen angenommen, dass nach Ablauf des Betrachtungszeitraums von 25 Jahren keine Zustandsverbesserung mehr möglich ist, das System demnach am Ende seiner Lebenszeit angelangt ist. Daher erfolgt auch keine Betrachtung eines Systemaustauschs innerhalb des Betrachtungszeitraums⁷¹.
5. Die Zustandsfunktion wird aus Messdaten einer Weiche ermittelt, die zwar gleichen Typs ist, aber unter anderen Einsatzbedingungen, als den für die Weichen im Investitionsszenario geltenden, arbeitet. Entsprechend sind Abweichungen zum tatsächlichen Abnutzungsverhalten möglich.

⁷¹ Sollte ein solches Szenario als sinnvoll erachtet werden, so ist eine Anpassung des Modells diesbezüglich einfach umsetzbar.

Die Simulationsumgebung ist beispielhaft in Anhang F dargestellt.

| | zeitabhängige Instandhaltung | zustandsabhängige Instandhaltung | ausfallorientierte Instandhaltung |
|--------------------|---|---|--|
| Barwert (8 %) [GE] | 1.352.507 | 104.288 | 1.520.124 |
| Ø Anzahl Ausfälle | 983 | 5 | 1124 |

Tabelle 8: Ergebnisse Strategiebewertung

Mit Tabelle 8 wird die besondere Stellung einer zustandsabhängigen Instandhaltungsstrategie deutlich. Unter den definierten Randbedingungen (vgl. Tabelle 7) nimmt diese Art der Instandhaltung eine Sonderstellung ein. Sie fällt über den Betrachtungszeitraum von 25 Jahren wesentlich günstiger aus als eine zeitabhängige oder ausfallorientierte Instandhaltung. So beträgt der Barwert der direkten und indirekten Instandhaltungskosten bei einer zustandsabhängigen Instandhaltung weniger als ein Zehntel der anfallenden Instandhaltungsausgaben der beiden anderen Instandhaltungsstrategien. Diese im Vergleich sehr niedrigen Kosten begründen sich durch die niedrige Anzahl kostenintensiver Ausfälle. Vorhersehbare Ausfälle können dank der mit dem Diagnosesystem geschaffenen kontinuierlichen Systemzustandsbeurteilung völlig vermieden werden. In der Strategiesimulation werden entsprechend präventive Instandhaltungsmaßnahmen ausgelöst, sobald für den Umstellvorgang beider Weichenzungen mehr als 350 Watt (vgl. Tabelle 7) benötigt werden. Der Wert 400 Watt, der einen vorhersehbaren Systemausfall impliziert, wird somit nicht erreicht. Die niedrige Anzahl an Ausfällen bestätigen außerdem den von STURM u. a. benannten Vorteil einer zustandsabhängigen Instandhaltung in Form höherer Zuverlässigkeit gegenüber einer zeitabhängigen Instandhaltungsstrategie ([Stu96], S. 107). Die Anzahl der Ausfälle liegt bei dem Bewertungsbeispiel bei der zustandsabhängigen Instandhaltung mit durchschnittlich 5 in 25 Jahren wesentlich niedriger als die durchschnittlich 983 Ausfälle der zeitabhängigen Instandhaltung. Die hohe Anzahl der Ausfälle bei der zeitabhängigen Instandhaltung ist durch die fehlende kontinuierliche Informationen über den Systemzustand begründet. So wird bei einer zeitabhängigen Instandhaltung analog zur derzeitigen Praxis jeweils nur nach Ablauf eines festgelegten Wartungszyklus der Zustand anhand von Messungen vor Ort erfasst und ggf. notwendige Maßnahmen eingeleitet (vgl. Abschnitt 6.3.2). Je nach Zeitpunkt der Inspektion und dem Fortschritt der Systemschädigung können jedoch mitunter kritische Zustandsbereiche (hier: 400 Watt) nicht frühzeitig erkannt und damit vorhersehbare, systembedingte Ausfälle nicht vermieden werden. Dies wird in der Simulation nachgebildet. Dadurch fällt die Kostendifferenz zwischen zeit- und zustandsabhängiger Instandhaltung sehr deutlich aus. Für die ausfallorientierte Instandhaltungsstrategie gilt, dass sie erwartungsgemäß die unwirtschaftlichste Alternative darstellt. Dies ist der hohen Anzahl an kostenintensiven Ausfällen geschuldet.

Die Simulationsergebnisse machen deutlich, dass angemessen an die hohen Betrieberschwerniskosten hohe Verfügbarkeitsanforderungen an das System zu stellen sind. Werden

Ausfälle wie bei der zustandsabhängigen Instandhaltung vermieden, so hat dies eine sehr hohe Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit der Instandhaltung. Aufgrund der hohen Ausfallfolgekosten beträgt die Differenz zwischen zustandsabhängiger und ausfallorientierter Instandhaltung in diesem Fallbeispiel sogar mehr als das in der Literatur beschriebene Drei- bis Vierfache ([Har95], S. 55).

In Summe belegt das Fallbeispiel klar und deutlich die in Abschnitt 5.2 aufgestellte zweite These. Mit ihr wird behauptet, dass eine aussagekräftige Instandhaltungsstrategiebewertung nur auf Basis einer detaillierten Zustandsbeschreibung möglich ist. Fest steht, dass nur mittels einer Zustandsmodellierung eine Bewertung unter Analyse betriebswirtschaftlicher wie systemischer Zusammenhänge erfolgen kann. Im Rahmen der Fallstudie ist die Zustandsmodellierung der Schlüssel zum Erfolg. Mit ihr wird der Kern einer Instandhaltungsstrategie, dem Auslösen von Instandhaltungsmaßnahmen entsprechend eintretender Zustandsveränderungen, praxisnah in einer Simulation nachempfunden und in Zusammenhang zu monetären Größen gesetzt. Die Zahlen in Tabelle 8 würden ohne diese Vorgehensweise nicht existieren. Eine Strategieentscheidung wäre mangelhaft, weil sie auf Basis unzureichender Informationen getroffen würde.

6.4 Entscheidungsgrundlage

Mit erfolgter Bewertung der möglichen Instandhaltungsstrategien für die im ersten Schritt identifizierten Investitionsstrategien 1...X ist die Basis für eine aus wirtschaftlicher Sicht wohl-durchdachten Investitionsstrategie geschaffen (vgl. Abbildung 26). Dabei erfolgt dies auf Basis detaillierter Kenntnisse über die finanziellen Vor- und Nachteile der Strategiealternativen über den gesamten Lebenszyklus (vgl. Abschnitt 6.2) unter expliziter Analyse aller möglichen Instandhaltungsstrategien für die beteiligten Infrastrukturelemente 1...p (vgl. 6.3) (vgl. Abbildung 25).

Aufgrund der aktuellen Informationslage hinsichtlich des Zustandsverhaltens eisenbahnsicherungstechnischer Infrastrukturelemente und des notwendigen Analyseumfangs sind die Ergebnisse der Instandhaltungsstrategiebewertung nur ein Ausschnitt und ermöglichen damit keine vollständige integrierte Bewertung des Untersuchungsraums. Dennoch lassen sich folgende wichtige Erkenntnisse festhalten.

1. Die Ergebnisse aus der Investitionsstrategiebewertung (erster Schritt) unterstreichen die oft geäußerte Forderung nach dem Einsatz zeitgemäßer Leit- und Sicherungstechnik und damit eine Reduktion personalintensiver mechanischer Stellwerkstechnik ([Bor07], S.8 f.). Nur automatisierte Systeme können das wirtschaftliche Überleben von Regionalstrecken ermöglichen ([Pac05], S. 101 f.). Für den Bewertungsraum einer eingleisigen Nebenstrecke empfiehlt sich entsprechend die Investition in den signalisierten Zugleitbetrieb oder den Einbau eines elektronischen Stellwerks mit zugehörigen ESTW-A. Wobei rein objektiv ersteres aufgrund niedrigerer LCC bei etwa gleichem Nutzen zu bevorzugen ist. Ein Weiterbetrieb der bereits verbauten Technik bzw. der Einsatz des ZLB ohne technische Unterstützung empfiehlt sich nicht (vgl. Abbildung 33).

2. Die Simulationsergebnisse im Rahmen der Instandhaltungsstrategiebewertung (zweiter Bewertungsschritt) bestätigen die zu erwartende Effizienzsteigerung in der Instandhaltung bei Umsetzung einer bedarfsgerechten zustandsorientierten Instandhaltung. Der Einsatz einer Diagnoseeinrichtung macht sich beim System Eisenbahnweiche aufgrund der hohen Verfügbarkeit und der im Vergleich sehr geringen Instandhaltungskosten bezahlt. Gleichzeitig verdeutlichen die Ergebnisse die z.T. erheblichen Ineffizienzen im derzeitig praktizierten Instandhaltungsmanagement.
3. Die hier vorgestellte Bewertungsmethode erlaubt die Abschätzung der Strategiepoteziale in Abhängigkeit vom Betrachtungsraum. Für das Streckenbeispiel empfiehlt sich, unter definierten Randbedingungen und Annahmen eine zustandsabhängige Instandhaltung der Eisenbahnweichen.

Das Verfahren der integrierten Bewertung der Investitions- und Instandhaltungsstrategien liefert für das Fallbeispiel folgende Investitionsempfehlung, die die wirtschaftlichste Investitionsstrategie über den Lebenszyklus darstellt: Setze den elektronisch signalisierten Zugleitbetrieb (ESZB) um. Und führe für die Weichen eine zustandsabhängige Instandhaltung durch.⁷² Dies schließt die Möglichkeit einer kontinuierlichen Zustandsüberwachung der einzelnen Sicherungssysteme ein. Wird von einer zustandsorientierten Instandhaltung abgewichen, bedeutet dies für die Instandhaltung einer Weiche, dass über den Betrachtungszeitraum mehr als 1 Mio. GE ineffizient eingesetzt werden. Auf die rund 60 elektrisch fernbedienten Weichen im Fallbeispiel hochgerechnet, stellt dies einen nicht unerheblichen Betrag dar.

In Anbetracht dieser Geldsummen bzw. potentieller wirtschaftlicher Risiken, ist damit auch die dritte These (vgl. Abschnitt 5.2) bestätigt. Eine rein LCC-basierte Investitionsentscheidung ohne Berücksichtigung der Stellhebel im Rahmen des Instandhaltungsmanagements greift für das langlebige Investitionsgut Bahnsicherungstechnik zu kurz. Das verantwortliche EIU läuft Gefahr, dass Gelder von mehreren Millionen zu viel ausgegeben werden, ohne dabei eine Gegenleistung in Form höherer Erträge zu erhalten. Für ein EIU ein höchst unwirtschaftliches Szenario.

⁷² Dies gilt unter der Annahme, die übrigen Sicherungssysteme weisen eine im Vergleich zur Eisenbahnweiche ähnliche Kostenstruktur der einzelnen Instandhaltungsstrategien auf.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Derzeit beherrscht ein zunehmender inter- und intramodaler Wettbewerb den Verkehrsmarkt. Des Weiteren sind die Eisenbahninfrastrukturunternehmen mit dem Problem einer steigenden Finanzierungslücke für notwendige (Re)Investitionsmaßnahmen konfrontiert. Um sich in diesem Umfeld behaupten zu können, spielen für den Verkehrsträger Schiene nachhaltige Investitionsentscheidungen in Eisenbahninfrastruktur eine wichtige Rolle. Ausgehend von den theoretischen Überlegungen zu Investitions- und Instandhaltungsstrategiebewertung, wird im Rahmen dieser Arbeit ein neues, weiterführendes Bewertungskonzept von Investitionsalternativen in Bahnsicherungstechnik erstellt. Die konzeptionellen Überlegungen werden in ein Werkzeug überführt und im Rahmen der Fallstudie exemplarisch angewendet. Die Ergebnisse der Fallstudie verdeutlichen, dass die mit der integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien erzielbaren Erkenntnisse in ihrer Genauigkeit und Qualität bei weitem die Ergebnisse aus bisherig eingesetzten Verfahren für die Investitionsbewertung von Bahnsicherungstechnik übertreffen.

Das Verfahren der integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien unterscheidet sich durch seinen integrativen Ansatz von den bereits im Bahnumfeld implementierten LCC-Anwendungen. Die Nutzung von Eisenbahnbetriebssimulationen zur Wirtschaftlichkeitsbewertung und die Modellierung der strategieabhängigen Instandhaltungskosten auf Basis des Schädigungsverhaltens der Betrachtungseinheit sind zwei vielversprechende Ansätze für die Bewertung von Investitionsalternativen. Mit ihnen fließen realistischere und präzisere Informationen in die Evaluation. Eine bessere Grundlage für wirtschaftliche Investitionsentscheidungen wird geschaffen.

Die Notwendigkeit für ein solches entscheidungsunterstützendes Instrumentarium ergibt sich aus den unternehmensexternen wie -internen Anforderungen sowie den z. T. erheblichen Effizienzverlusten im zumeist zeitbezogenen Instandhaltungsmanagement der Bahnsicherungstechnik. Die unbedingte Daseinsberechtigung des Verfahrens wird mit der Fallstudie verdeutlicht. Diese liefert einen ersten Eindruck von den Geldmengen (Mio.), die allein mit einer wohldurchdachten, auf den Ergebnissen der integrierten Bewertung bauenden Investitionsentscheidung effizienter eingesetzt werden können. Dies wiederum stärkt den Verkehrsträger Schiene nachhaltig. Gleichzeitig zeigt das Fallbeispiel auch klar auf, dass für die Etablierung dieser Bewertungsmethodik umfassende Informationen über Schädigung und Schädigungsursachen der einzelnen bahnsicherungstechnischen Systeme notwendig sind. Da diese zum derzeitigen Zeitpunkt in nur geringem Umfang vorhanden sind, besteht hierzu eindeutiger Handlungsbedarf von Seiten der Forschung.

In Summe ermöglicht das Verfahren, die aus unternehmerischer Sicht sinnvollste Investitionsstrategie unter Berücksichtigung der kostenoptimalen Instandhaltungsstrategie in strukturier-

ter und für den Anwender handhabbarer Form zu identifizieren. Neben der reinen Anwendung als Entscheidungsunterstützungsinstrumentarium (Decision Support System) eignet sich dieses Verfahren zudem für eine erste Planung der notwendigen Ressourcen für die während der Anlagennutzung auszuführenden Instandhaltungsmaßnahmen.

Zusammenfassend verschafft die integrierte Bewertung den Bewertenden folgende Vorteile

- Das Entscheidungsproblem wird systematisch aufgearbeitet und die gewonnenen Ergebnisse schaffen einen hohen Grad an Transparenz.
- Die Erkenntnisse aus Betriebssimulation sowie prognostischer Zustandsmodellierung verbessern im Vergleich zu bisherigen Ansätzen das Bewertungsergebnis erheblich.
- Die Trennung von Eisenbahnbetriebssimulation und Wirtschaftlichkeitsbewertung erleichtert die Methodenanwendung in der Praxis. Die Investitionsentscheider benötigen zur Verfahrensanwendung keine detaillierten Projektierungskennnisse, da diese zuvor getrennt von einem streckenverantwortlichen Ingenieur in die Betriebssimulation eingearbeitet werden.
- Untersuchungen der Auswirkungen von Änderungen in den Randparametern auf die Wirtschaftlichkeit, z. B. eine Änderung der Intervalle einer zeitabhängigen Instandhaltung oder Veränderungen in der Belastung der Betrachtungseinheit je Zeiteinheit (Sensitivitätsbetrachtungen), sind aufgrund einer simulativen Unterstützung einfach umzusetzen.
- Die Kosten- und quantitativen Nutzengrößen werden ihrem zeitlichen Eintreten entsprechend mit Hilfe der Nettobarwertmethode differenziert nach ihrem unternehmerischen Einfluss gewertet.
- Die entscheidenden wirtschaftlichen Erfolgsfaktoren im Lebenszyklus von Bahnsicherungstechnik werden identifiziert [BRJ08].

Dabei können diese Vorzüge in einem breiten Leistungsspektrum der integrierten Bewertung genutzt werden. Das Bewertungsverfahren ist unterstützend bei folgenden Aufgabenstellungen sinnvoll einsetzbar:

- Identifikation einer anforderungsgerechten Bahnsicherungstechnik [Bus09],
- strategische Ressourcenplanung,
- Bewertung eines möglichen Outsourcing von Instandhaltungsmaßnahmen und
- Evaluation von Ersatzinvestitionsentscheidungen.

7.2 Ausblick

Aufgrund der hohen Relevanz und der großen Anwendungsbreite der integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien für Bahnsicherungstechnik für den Betreiber sollte mit weiteren Arbeiten eine

- Verbesserung der Schnittstelle zwischen Betriebssimulationssoftware und Wirtschaftlichkeitsbewertungsinstrument durch Verwendung eines standardisierten Datenaustauschformats wie bspw. railML,
- Untersuchung von Schädigungsfunktionen für die Systeme der Bahnsicherungstechnik unter Betrachtung des Systemtyps und der geltenden Einsatzbedingungen [Gut09b],
- Untersuchung der Kosteneinflüsse von organisatorischen und personalstrukturellen Entscheidungen im Rahmen des Instandhaltungsmanagements,
- Berücksichtigung der räumlichen Anordnung von Anlagen im Instandhaltungsstrategiebewertungsinstrument

angestrebt werden.

Während mit zuvor genannten Arbeiten eine Verfeinerung der integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien für die Bahnsicherungstechnik angestrebt wird, ist ebenso eine erweiterte Sichtweise des Bewertungsansatzes zu prüfen. Denn bisher liegt der Fokus der Betrachtung auf der Betreibersicht. Zweifelsohne bestehen jedoch in der Nutzungsphase einer Anlage auch Berührungspunkte mit den Herstellern (vgl. Abbildung 7). So muss dieser bspw. seine Ersatzteilverhaltung abstimmen bzw. einen geeigneten Abkündigungszeitpunkt (Generationenwechsel) definieren. Gleichzeitig werden sich Hersteller von Bahnsicherungstechnik zunehmend der betriebswirtschaftlichen Bedeutung von After Sales Services bewusst [BBM06] [LNG+06]. Um als Hersteller die in der Nutzungsphase der Anlagen vorhandenen unternehmerischen Potentiale gewinnbringend abschöpfen zu können, ist das Wissen über den Einsatz und das Verhalten der Anlagen im Betrieb unabdingbar. Die Ergebnisse aus der integrierten Bewertung können wichtige Informationen liefern, um als Hersteller als attraktiver Dienstleister (z.B. im Rahmen von Full-Service Verträgen) auftreten zu können. Für mögliche Dritte, wie bspw. im Rahmen von PPPs oder Leasing- bzw. Vermiet- und Servicekonzepten, können die mittels integrierter Bewertung gewonnenen Erkenntnisse über die Anlagenutzung in ähnlicher Weise von Interesse sein. Eine weitere Überlegung ergibt sich aus einem möglichen Transfer der Erkenntnisse aus der Nutzungsphase in die Phase der Anlagenentwicklung. So lassen die Ergebnisse der Investitions- und Instandhaltungsstrategiebewertung Rückschlüsse auf einen marktgetriebenen Innovationsbedarf zu, der zielgerichtet in der Anlagenkonzeptionierung und -entwicklung durch die Hersteller adressiert werden kann [Saa97] [Dau02] [BS02] [Hus07]. Die sich aus diesen, über die reine Betreibersicht hinausgehenden Überlegungen ergebenden Fragestellungen sind, wie die integrierte Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien in den Entscheidungs- bzw. Angebotsprozess von Herstellern und Dritten eingebunden werden kann und in wieweit möglicherweise Anpassungen im Bewertungsansatz notwendig sind.

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------|--|
| Abb. | Abbildung |
| AV | Abnutzungsvorrat |
| BEK | Betriebserschwerungskosten (je Minute) |
| BMBF | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| BMWi | Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie |
| bspw. | beispielsweise |
| BV | Betriebsverfahren |
| bzgl. | Bezüglich |
| bzw. | beziehungsweise |
| ca. | circa |
| d. h. | das heißt |
| DB AG | Deutsche Bahn Aktiengesellschaft |
| DIN | Deutsches Institut für Normung e.V. |
| DLR | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. |
| EBO | Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung |
| EIU | Eisenbahninfrastrukturunternehmen |
| EMSTW | elektromechanisches Stellwerk |
| EN | Europäische Norm |
| ESTW | elektronisches Stellwerk |
| ESTW-Z | elektronisches Stellwerk – Zentrale |
| ESTW-A | elektronisches Stellwerk – Außenstation |
| ESZB | elektronisch signalisierter Zugleitbetrieb |
| ETCS | European Train Control System |
| etc. | et cetera |
| EU | Europäische Union |
| EVU | Eisenbahnverkehrsunternehmen |
| EWA | Erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse |
| GE | Geldeinheit |
| ggf. | gegebenenfalls |

| | |
|----------|--|
| i. d. R. | in der Regel |
| IEC | Internationale Elektronische Kommission, Normierungs- |
| i. e. S. | im engeren Sinne |
| IFS | Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR |
| i. w. S. | im weiteren Sinne |
| KK | Kapitalkosten |
| KoRil | Konzernrichtlinie (DB AG) |
| LCC | Life Cycle Costs – dt. Lebenszykluskosten |
| LST | Eisenbahnleit- und –sicherungstechnik |
| LZB | Linienzugbeeinflussung |
| MTBF | Mean Time Between Failures |
| MSTW | mechanisches Stellwerk |
| MTTR | Mean Time To Repair |
| PPP | Public Private Partnership |
| PZB | Punktförmige Zugbeeinflussung |
| RSTW | Relaisstellwerk |
| TPM | Total Productive Maintenance |
| u. a. | unter anderem |
| usw. | und so weiter |
| UIC | Union Internationale des Chemins de Fer (Internationaler Eisenbahnverband) |
| v. a. | vor allem |
| VDV | Verband Deutscher Verkehrsunternehmen |
| vgl. | vergleiche |
| vs. | versus |
| z. B. | zum Beispiel |
| ZLB | Zugleitbetrieb |
| ZRV | Zungenrollvorrichtung |
| z. T. | zum Teil |

Verzeichnis Formelzeichen

| | |
|--------------------------------|--|
| i | Kalkulationszinssatz |
| C_0 | Kapitalwert |
| K | Kosten |
| E | Einnahmen (monetärer Nutzen) |
| μ^* | unbekannter wahrer Wert |
| \bar{x} | Stichprobenmittelwert (geschätzter Wert) |
| σ | Standardabweichung (Streuungsmaß) |
| α | Irrtumswahrscheinlichkeit |
| L | Konfidenzintervall |
| $z_{\alpha/2}$ | Quantil der Standardnormalverteilung |
| n | Stichprobenumfang |
| $F(t)$ | Ausfallfunktion |
| $R(t)$ oder $R(x)$ | Zuverlässigkeitsfunktion |
| $\lambda(t)$ oder $\lambda(x)$ | Ausfallrate |
| $N(t)$ | funktionsfähiger Anlagenbestand |
| $E(T)$ | mittlere Lebensdauer |
| $AV(t)$ | Abnutzungsvorrat |
| $A(t)$ | Systemverfügbarkeit |
| $W(x)$ | Zustandsänderungsfunktion |
| $P_P(v)$ | Verspätungsfunktion |
| d_m | durchschnittliche Verspätung |
| d_{max} | maximale Verspätung |
| P_e | Wahrscheinlichkeit einer Verspätung |

Anhang A: Instandhaltungsterminologie

Im Folgenden sind die wichtigsten Begriffe zum Thema Instandhaltung, wie sie in diesem Buch verwendet werden, aufgelistet. Ihre nachfolgend aufgeführten Definitionen basieren auf der DIN 31051:2003-06, der DIN EN 13306:2001-09, der DIN EN 50129:2003-12 und der VDI/VDE-Richtlinie 3542.

| | |
|-----------------------------------|---|
| Abnutzungsvorrat | Vorrat der möglichen Funktionserfüllung unter festgelegten Bedingungen, der einer Betrachtungseinheit aufgrund der Herstellung, Instandsetzung oder Verbesserung innewohnt. |
| Ausfall | Abnormaler Zustand, der zu einem Fehlzustand in einem System führen kann. Ein Ausfall kann zufällig oder systematisch sein. |
| Ausfallorientierte Instandhaltung | Instandhaltung, ausgeführt nach der Fehlererkennung, um eine Einheit in einen Zustand zu bringen, in dem sie eine geforderte Funktion erfüllen kann. |
| Ausfallrate | Anzahl der Ausfälle einer Einheit während eines gegebenen Zeitintervalls dividiert durch dieses Zeitintervall. |
| Betrachtungseinheit | Jedes Teil, Bauelement, Gerät, Teilsystem, jede Funktionseinheit, jedes Betriebsmittel oder System, das für sich bei der Definition von Instandhaltungsmaßnahmen betrachtet werden kann. |
| Entstörung | Siehe Instandsetzung |
| Ersatz | Austausch einer noch funktionsfähigen Einheit. |
| Fehler | Unzulässige Nichtübereinstimmung eines bestimmten Istmerkmals einer Betrachtungseinheit (BE) mit dem Soll. |
| Inspektion | Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustands einer Betrachtungseinheit. |
| Instandhaltung | Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustands oder die Rückführung in diesen, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann. |

| | |
|------------------------------------|---|
| Instandsetzung | Maßnahmen zur Rückführung einer Betrachtungseinheit in den funktionsfähigen Zustand. |
| Korrektive Instandhaltung | Umfasst alle Instandhaltungsmaßnahmen, die nach Eintritt eines Ausfalls notwendig sind, um den funktionsfähigen Zustand der Betrachtungseinheit zu erreichen. |
| Perfektive Instandhaltung | Umfasst alle Instandhaltungsmaßnahmen, die Verbesserungen der Betrachtungseinheit erzielen. |
| Präventive Instandhaltung | Umfasst alle Instandhaltungsmaßnahmen, um Ausfälle zu vermeiden und eine Verminderung der Ausfallwahrscheinlichkeit und des potentiellen Schadensausmaßes zu erzielen. |
| Schädigung | Bleibende Veränderungen der Einheit durch Beanspruchung. |
| Verbesserung | Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements zur Steigerung der Funktionssicherheit einer Betrachtungseinheit, ohne die von ihr geforderte Funktion zu ändern. |
| Verfügbarkeit | Fähigkeit einer Einheit, zu einem gegebenen Zeitpunkt oder während eines gegebenen Zeitintervalls in einem Zustand zu sein, dass sie eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen unter der Annahme erfüllen kann, dass die erforderlichen äußeren Hilfsmittel bereitgestellt sind. |
| Wartung | Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrats. |
| Zeitabhängige Instandhaltung | Präventive Instandhaltungsstrategie, deren Maßnahmen nach einem festgelegten Zeitplan oder einer festgelegten Zahl von Nutzungseinheiten erfolgen. |
| Zuverlässigkeit | Fähigkeit einer Einheit, eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen für ein gegebenes Zeitintervall zu erfüllen. |
| Zustandsorientierte Instandhaltung | Präventive Instandhaltungsstrategie, die aus der Überwachung der Arbeitsweise und/ oder der sie darstellenden Messgröße sowie den nachfolgenden Maßnahmen besteht. Die Funktions- und Messgrößenüberwachung kann nach Plan, auf Anforderung oder kontinuierlich erfolgen. |

Anhang B: Komplexitätsberechnung der Instandhaltungsstrategiebewertung

Im Folgenden wird die Komplexität der Instandhaltungsstrategiebewertung ausgewiesen. Dabei wird im Besonderen auf Abbildung 23 und Abbildung 26 Bezug genommen. Abbildung 23 beschreibt den Prozess der Instandhaltungsstrategiebewertung und Abbildung 26 schafft die Einordnung der Instandhaltungsstrategiebewertung in den Ablauf der integrierten Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien für die Bahnsicherungstechnik.

Die Komplexität der Instandhaltungsstrategiebewertung lässt sich anhand des Lösungsraums L (Gleichungen [20]) und der damit verbundenen Anzahl an Rechenschritten R (Gleichung [21]) beschreiben. Wobei der erste Summand in L die Menge aller möglichen Instandhaltungsstrategien für jedes einzelne Infrastrukturelement erfasst. Der zweite Summand bewertet dazu alternative Strategien, die sich aus dem gemeinsamen instandhalten von z.B. örtlich beieinanderliegenden Infrastrukturelementen und damit einer möglichen Optimierung der Einzelstrategien ergeben. Dazu wird jeweils nur eine Instandhaltungsstrategie (i. d. R. die günstigste) je Infrastrukturelement in den Optimierungsschritt übernommen.

$$L = \sum_{i=1}^N M_i + \sum_{g=1}^G \left[\prod_{e=1}^{|A_g|} \left(\frac{O_{g_e}}{W_{g_e}} + 1 \right) \right] \quad [20]$$

$$R = L \cdot S \quad [21]$$

mit

$$\begin{aligned} G &= |T|, \\ T &= \left\{ |A_1|; |A_2|; \dots; |A_g| \right\} \\ A_1 &= \{a_{11}, \dots, a_{1e}\} = \{\{O_{11}; W_{11}\}, \dots, \{O_{1e}; W_{1e}\}\}, \\ &\dots \\ A_g &= \{a_{g1}, \dots, a_{ge}\} = \{\{O_{g1}; W_{g1}\}, \dots, \{O_{ge}; W_{ge}\}\} \end{aligned}$$

Entsprechend der formalen Beschreibung gilt:

M_i – mögliche Instandhaltungsstrategien für das Infrastrukturelement i des gesamten Betrachtungsraums

N – Anzahl an Infrastrukturelementen des gesamten Betrachtungsraums

G – Anzahl an örtlich gemeinsam zu optimierenden Gruppen an Infrastrukturelementen

T – Menge der Anzahl an Infrastrukturelementen in den Gruppen

A_g – Menge der Infrastrukturelemente a in der Gruppe g , mit $g=1, \dots, G$

O_{g_e} – Optimierungsspannbreite für Infrastrukturelement a_e der Gruppe g , $e=1,2,\dots,t$

$t \in T$

W_{g_e} – Optimierungsschrittweite für Infrastrukturelement a_e der Gruppe g , $e=1,2,\dots,t$

$t \in T$; $W_{g_e} \neq 0$

S – Simulationsdauer in Zeiteinheiten

Aus der Fülle der denkbaren Möglichkeiten im diskreten Lösungsraum L lässt sich mit Hilfe von Simulation wesentlich schneller die optimale Lösung bestimmen.

Die Komplexität sei abschließend an beispielhaft gewählten Zahlen verdeutlicht. Die für dieses Beispiel geltenden Zahlen sind bewusst niedrig gehalten, um so die Anschaulichkeit zu wahren. Damit fällt die Komplexität für dieses Beispiel jedoch auch wesentlich niedriger aus als in tatsächlichen Entscheidungssituationen (vgl. Kapitel 6). Das Beispiel umfasst $N=7$ Infrastrukturelemente, die in $G=2$ örtlichen Gruppen zusammenzufassen sind. Für jedes Infrastrukturelement sind 3 Instandhaltungsstrategien betrieblich und technisch möglich. Die Gruppen gestalten sich wie folgt:

$g=1$, A_1 :

1 Achszähler mit Optimierungsspannweite von 4 Tagen⁷³ und einer Optimierungsschrittweite von 2 Tagen

2 Signale mit einer Optimierungsspannweite von 10 Tagen und einer Optimierungsschrittweite von 2 Tagen

-> $T_1=3$

$g=2$, A_2 :

2 Signale mit einer Optimierungsspannweite von 10 Tagen und einer Optimierungsschrittweite von 2 Tagen

1 Weiche mit einer Optimierungsspannweite von 10 Watt und einer Optimierungsschrittweite von 5 Watt

1 Achszähler mit Optimierungsspannweite von 4 Tagen und einer Optimierungsschrittweite von 2 Tagen

⁷³ Z. B. kann der Zeitpunkt der präventiven Maßnahme zwischen dem 26 und 30 Tag nach der letzten Instandhaltungsmaßnahme erfolgen, ohne dass dies Einflüsse auf die Systemverfügbarkeit nimmt.

-> $T_2=4$

Das Ganze soll über einen Simulationszeitraum von 730 Tagen betrachtet werden.

Damit ergibt sich für den Lösungsraum L:

$$L = 3 \times 7 + \left[\left(\frac{4}{2} + 1 \right) \times \left(\frac{10}{2} + 1 \right)^2 \right] + \left[\left(\frac{10}{2} + 1 \right)^2 \times \left(\frac{10}{5} + 1 \right) \times \left(\frac{4}{2} + 1 \right) \right] = 453$$

Die Anzahl der notwendigen Rechenschritte bemisst sich bereits bei diesem vergleichsweise einfachen Beispiel auf über $33 \cdot 10^4$.

$$R = 453 \times 730 \approx 33 \cdot 10^4$$

Die Komplexität steigt mit

- der Größe des Betrachtungsraums und damit mit zunehmender Anzahl der zu beachtenden Infrastrukturelemente,
- steigender Anzahl an Infrastrukturelementen in einer Gruppe,
- steigender Optimierungsspannweite und/ oder sinkender Optimierungsschrittweite sowie
- steigender Länge des Bewertungszeitraums/ Simulationszeitraums bzw. sinkender Zeitschrittlänge (z.B. anstatt wochenweise eine tageweise Berechnung).

Anhang C: LCC-Analyse für die Investitionsstrategien A0 - A3

Die in den Anhängen C.1 – C.4 aufgeführten Tabellen enthalten die Kosten in den Betrachtungsjahren $t = 0, 1, \dots, 24$ für die jeweilige Investitionsstrategie. Entsprechend der Unterscheidung auf S.94 wird bei der monetären Bewertung in 4 Kostenblöcke unterschieden (Spalte 1). Unter der Annahme eines unveränderten Fahrplans und konstanten Stundenkosten bleiben die Betriebskosten unverändert. Die Jahressummen werden mittels des Diskontierungsfaktors abdiskontiert und anschließend zur Ermittlung der Größe LCC aufaddiert (vgl. [1])

Anhang C.1: Ergebnisse finanzanalytische Bewertung Fallbeispiel – Referenzszenario (A0)

| Jahr | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Kaufpreis | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Planungs-kosten | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rückbau-kosten | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Betriebs-kosten (exkl. Energie) | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 |
| Total p.a. | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 | 4736370 |
| Diskontie-rungsfakt or (i=8%) | 1,000 | 0,926 | 0,857 | 0,794 | 0,735 | 0,681 | 0,630 | 0,583 | 0,540 | 0,500 | 0,463 | 0,429 | 0,397 | 0,368 | 0,340 | 0,315 | 0,292 | 0,270 | 0,250 | 0,232 | 0,215 | 0,199 | 0,184 | 0,170 | 0,158 |
| Barwert | 4736370 | 4385528 | 4060674 | 3759883 | 3481373 | 3223494 | 2984716 | 2763626 | 2558913 | 2369364 | 2193856 | 2031348 | 1880878 | 1741553 | 1612549 | 1493101 | 1382501 | 1280094 | 1185272 | 1097474 | 1016180 | 940907 | 871210 | 806676 | 746922 |

| | |
|-----|------------|
| LCC | 54.604.462 |
|-----|------------|

Anhang C.2: Ergebnisse finanzanalytische Bewertung Fallbeispiel – Zugmeldeverfahren mit ESTW (A1)

| Jahr | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|---------------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Kaufpreis | 22448000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Planungs-kosten | 2918240 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rückbau-kosten | 168550 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Betriebs-kosten (exkl. Energie) | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Total p.a. | 25830813 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 | 296023 |
| Diskontie-rungsfaktor (=8%) | 1,000 | 0,926 | 0,857 | 0,794 | 0,735 | 0,681 | 0,630 | 0,583 | 0,540 | 0,500 | 0,463 | 0,429 | 0,397 | 0,368 | 0,340 | 0,315 | 0,292 | 0,270 | 0,250 | 0,232 | 0,215 | 0,199 | 0,184 | 0,170 | 0,158 |
| Barwert | 25830813 | 274095 | 253792 | 234993 | 217586 | 201468 | 186545 | 172727 | 159932 | 148085 | 137116 | 126959 | 117555 | 108847 | 100784 | 93319 | 86406 | 80006 | 74079 | 68592 | 63511 | 58807 | 54451 | 50417 | 46683 |

| | |
|-----|------------|
| LCC | 28.947.569 |
|-----|------------|

Anhang C.3: Ergebnisse finanzanalytische Bewertung Fallbeispiel – ESZB (A2)

| Jahr | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|--------------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Kaufpreis | 16836000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Planungskosten | 2188680 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rückbaukosten | 168550 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Betriebskosten (exkl. Energie) | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Total p.a. | 19785276 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 | 592046 |
| Diskontierungsfaktor (i=8%) | 1,000 | 0,926 | 0,857 | 0,794 | 0,735 | 0,681 | 0,630 | 0,583 | 0,540 | 0,500 | 0,463 | 0,429 | 0,397 | 0,368 | 0,340 | 0,315 | 0,292 | 0,270 | 0,250 | 0,232 | 0,215 | 0,199 | 0,184 | 0,170 | 0,158 |
| Barwert | 19785276 | 548191 | 507584 | 469985 | 435172 | 402937 | 373090 | 345453 | 319864 | 296171 | 274232 | 253918 | 235110 | 217694 | 201569 | 186638 | 172813 | 160012 | 148159 | 137184 | 127022 | 117613 | 108901 | 100835 | 93365 |

| | |
|-----|------------|
| LCC | 26.018.788 |
|-----|------------|

Anhang C.4: Ergebnisse finanzanalytische Bewertung Fallbeispiel – ZLB (A3)

| Jahr | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Kaufpreis | 106800 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Planungs-kosten | 13884 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rückbau-kosten | 175150 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Betriebs-kosten exkl. Energie) | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 |
| Total p.a. | 1479926 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 | 1184092 |
| Diskontie- ungsfaktor i=8%) | 1,000 | 0,926 | 0,857 | 0,794 | 0,735 | 0,681 | 0,630 | 0,583 | 0,540 | 0,500 | 0,463 | 0,429 | 0,397 | 0,368 | 0,340 | 0,315 | 0,292 | 0,270 | 0,250 | 0,232 | 0,215 | 0,199 | 0,184 | 0,170 | 0,158 |
| Barwert | 1479926 | 1096382 | 1015168 | 939971 | 870343 | 805873 | 746179 | 690907 | 639728 | 592341 | 548464 | 507837 | 470219 | 435388 | 403137 | 373275 | 345625 | 320023 | 296318 | 274369 | 254045 | 235227 | 217803 | 201669 | 186731 |

| | |
|-----|------------|
| LCC | 13.946.950 |
|-----|------------|

Anhang D: Matrixverfahren Fallbeispiel

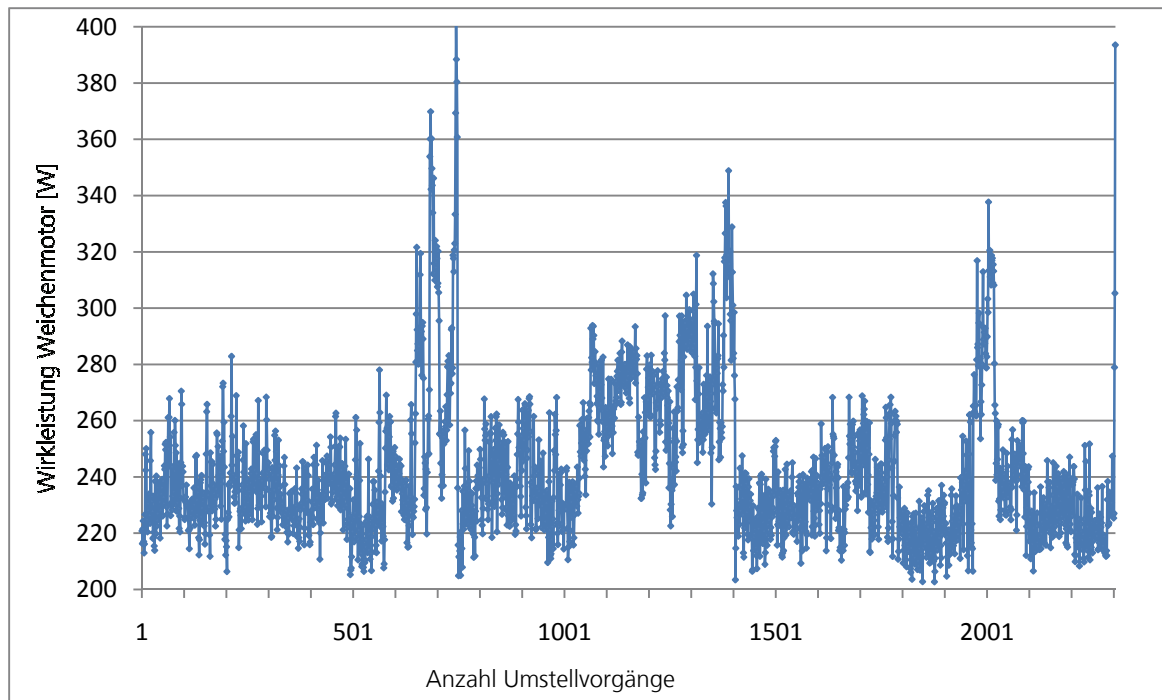
| Kriterien | Sicherheit | Dispositions- management | Erweiterungs- möglichkeit der Strecken-geschw. | Fremdnutzung der Zuglauf- verfolgung | Möglichkeit von Zugkreuzungen/ überholungen | Abbaubarkeit von Verspätungen | Flexibilität bei baulicher Umgestaltung | Flexibles Störungs- management | Kapazitäts- überschuss | Punkte | Gewichtung |
|---|------------|-----------------------------|--|--|---|----------------------------------|---|--------------------------------------|---------------------------|--------|------------|
| Sicherheit | | 4* | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 32 | 22,2% |
| Dispositions- management | 0* | | 2 | 4 | 3 | 2 | 3 | 1 | 3 | 18 | 12,5% |
| Erweiterungs- möglichkeit der Streckengeschw. | 0 | 2 | | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 | 14 | 9,7% |
| Fremdnutzung der Zuglauf-verfolgung | 0 | 0 | 1 | | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 4 | 2,8% |
| Möglichkeit von Zugkreuzungen/ - überholungen | 0 | 1 | 2 | 3 | | 1 | 3 | 1 | 3 | 14 | 9,7% |
| Abbaubarkeit von Verspätungen | 0 | 2 | 3 | 4 | 3 | | 3 | 2 | 3 | 20 | 13,9% |
| Flexibilität bei baulicher Umgestaltung | 0 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | | 0 | 1 | 8 | 5,6% |
| Flexibles Störungs- management | 0 | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 | 4 | | 3 | 22 | 15,3% |
| Kapazitäts-überschuss | 0 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 3 | 1 | | 12 | 8,3% |
| Summe: | | | | | | | | | | 144 | 100% |

*Erläuterung der Punkteinterpretation an diesem Beispiel: Das Nutzenkriterium Sicherheit (i) erhält im Vergleich zum Nutzenkriterium Dispositionsmanagement (j) 4 Nutzenpunkte, ist also viel wichtiger als ein funktionstüchtiges Dispositionsmanagement. Umgekehrt bedeutet dies, dass Dispositionsmanagement 0 Nutzenpunkte im direkten Vergleich zur Verkehrssicherheit erhält, also viel unwichtiger ist.

Anhang E: Zustandsinformationen

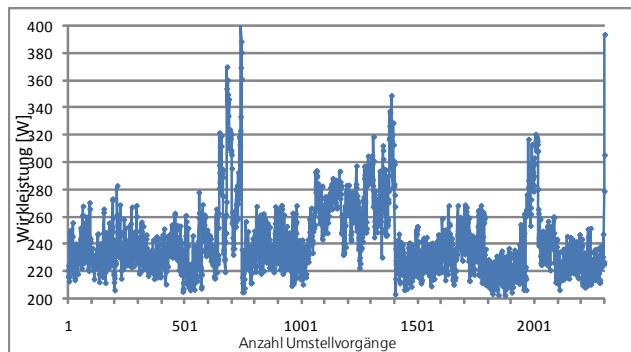
Anhang E.1: Messwerte aus SIDIS W

(Beispielweiche ohne ZRV; Betrachtungszeitraum: 1 Jahr)

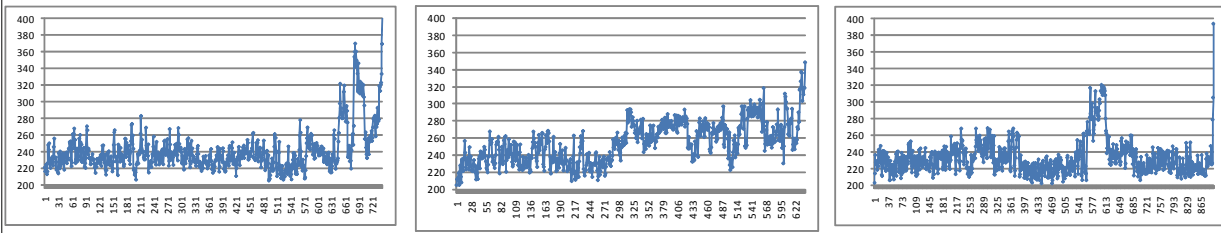


Anhang E.2: Ermittlung Zustandsgleichung

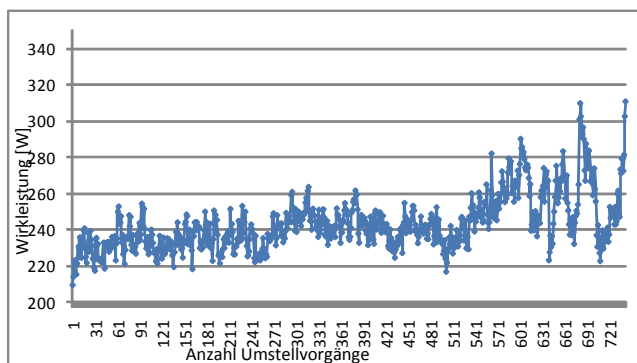
0. Eingabe: Messwertreihe



1. Unterteilung der Messreihe in Zeitfenster zwischen zwei Instandsetzungen und Überprüfung der Ähnlichkeit in den Verläufen



2. Mittelung der Messwerte über die Zeitfenster

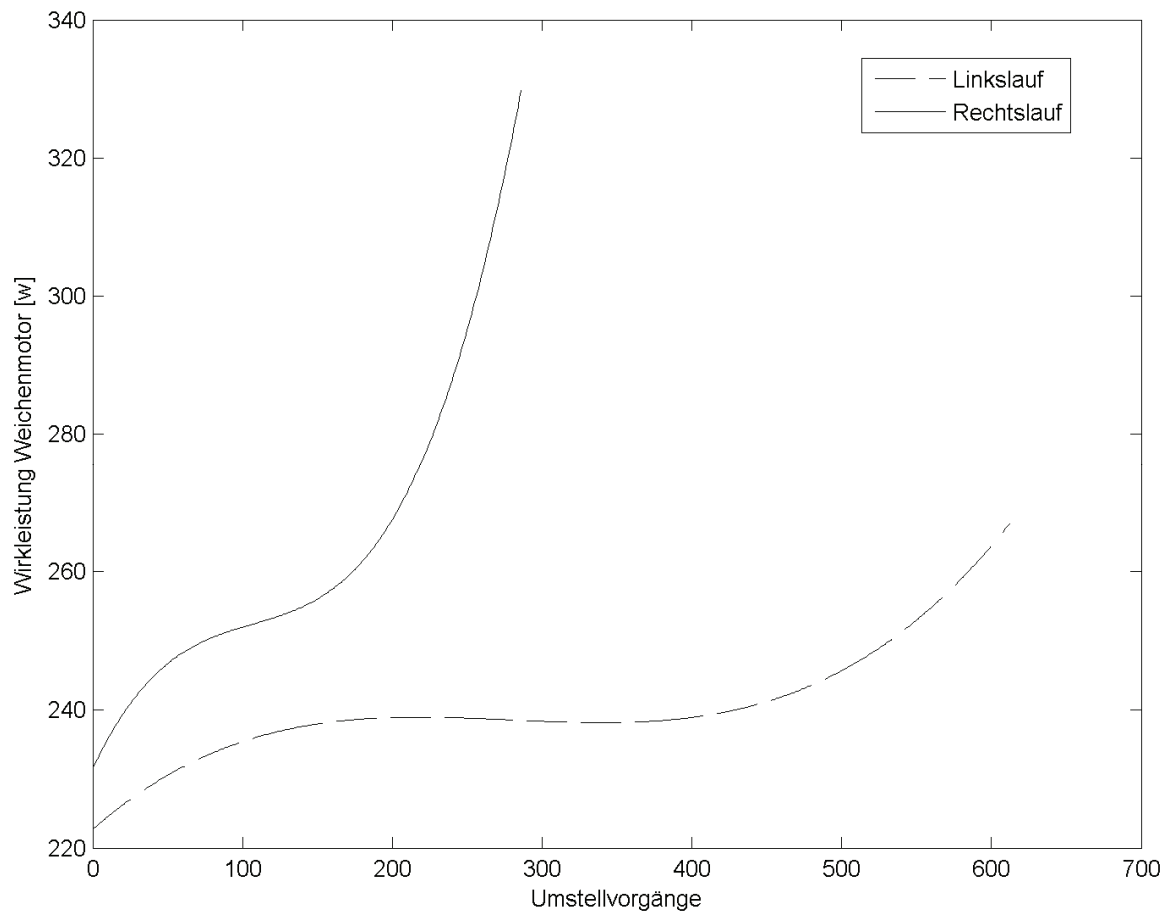


3. Polynominterpolation (z.B. m. H. von Matlab®)

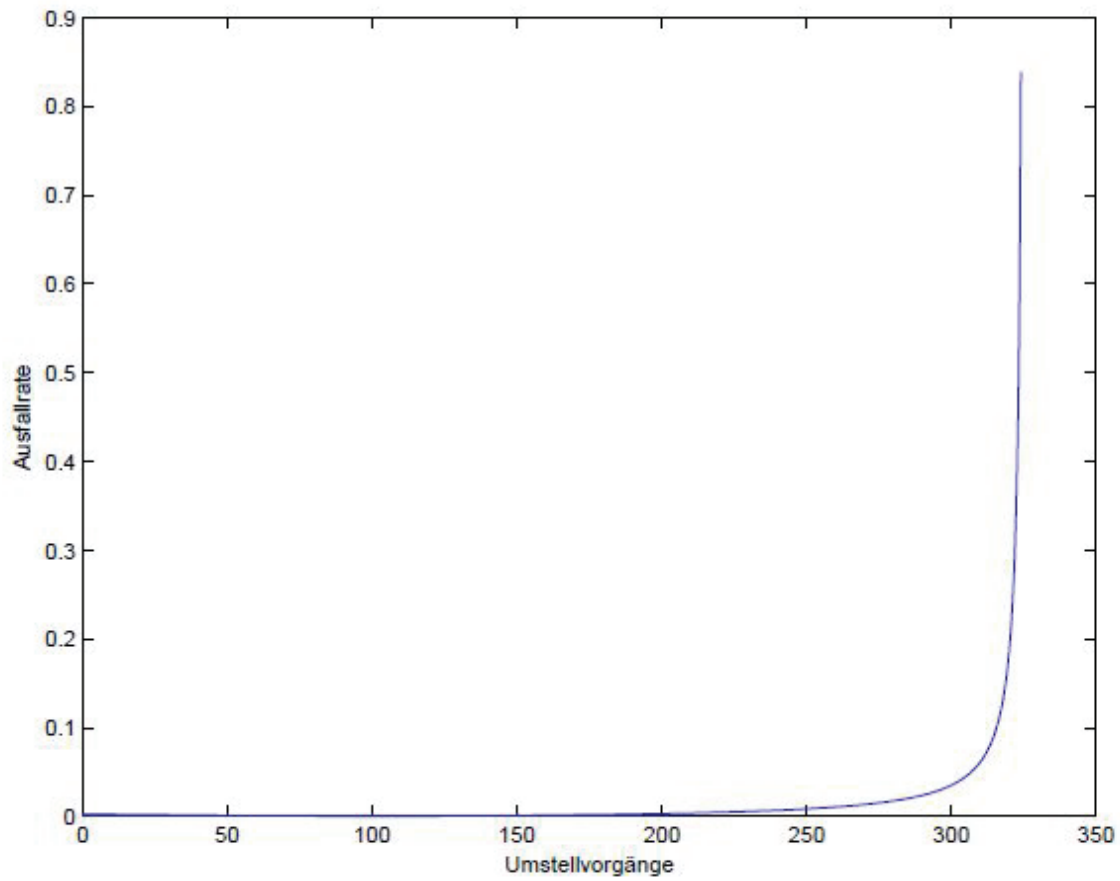
4. Ausgabe: Zustandsgleichung

$$W(x) = 0,000012 x^3 - 0,0037 x^2 + 0,459 x + 231,5$$

Anhang E.3: Abnutzungskurve Beispielweiche (ohne ZRV)

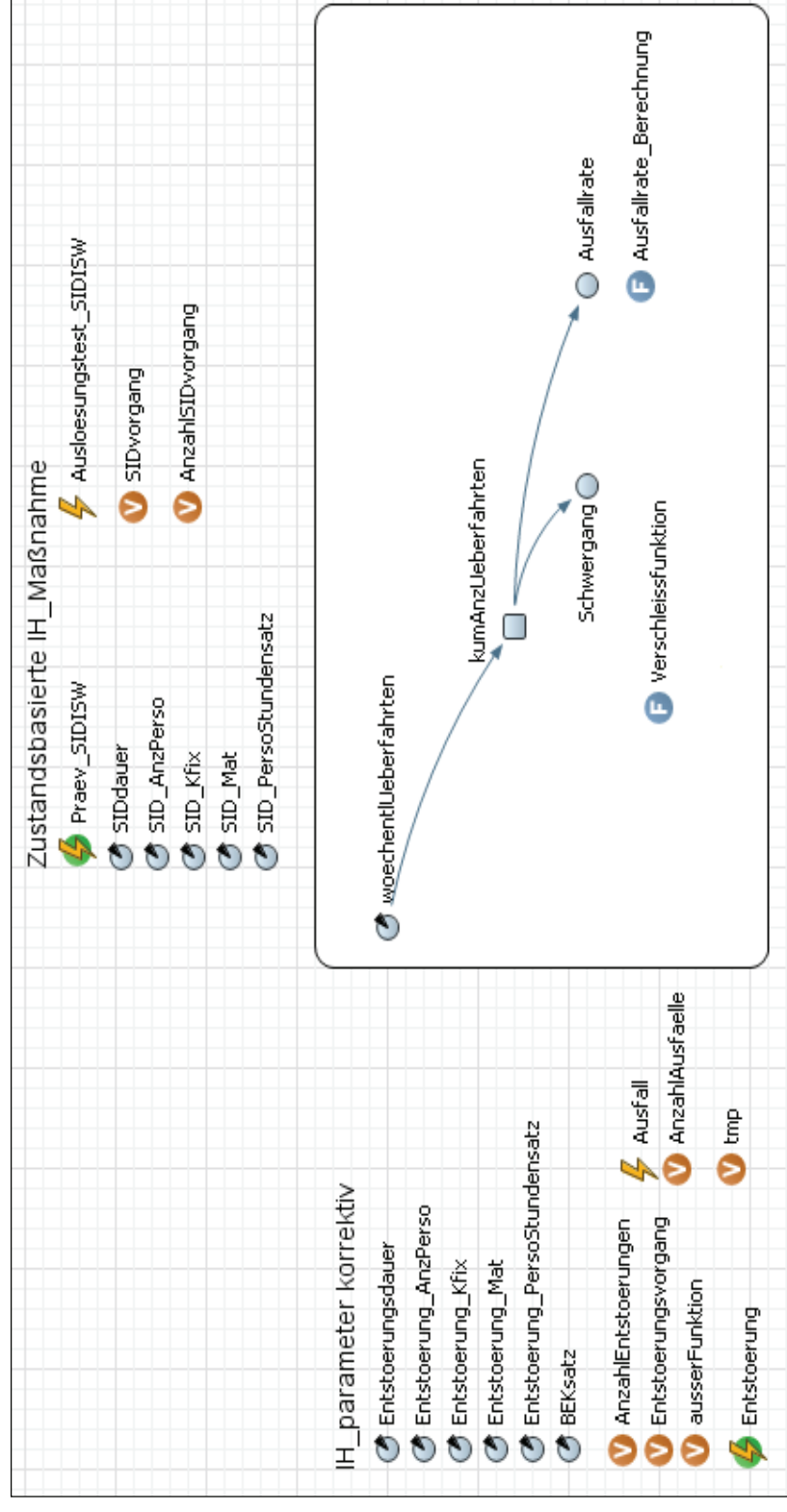


Anhang E.4: Ausfallrate Beispielweiche (ohne ZRV)



Anhang F: Simulationsumgebung für die Instandhaltungsstrategiebewertung

Dargestellt am Beispiel der zustandsabhängigen Instandhaltungsstrategie für eine Weiche



Literaturverzeichnis

- [Ack98] Ackermann, Till (1998): Die Bewertung der Pünktlichkeit als Qualitätsparameter im Schienenpersonenverkehr auf Basis der direkten Nutzenmessung. Stuttgart.
- [Ada89] Adam, Sarwat (1989): Optimierung der Anlageninstandhaltung: Verfügbarkeitsanforderung, Ausfallfolgekosten und Ausfallverhalten als Bestimmungsgrößen wirtschaftlich sinnvoller Instandhaltungsstrategien. Berlin: E. Schmidt.
- [BBM06] Barkawi, K.; Baader, A.; Montanus, S. (2006): Erfolgreich im After Sales Services: Geschäftsstrategie für Service Management und Ersatzteillogistik. Berlin [u.a.]: Springer
- [BR93] Baum, A.; Rosenbrock, S. (1993): Entwicklung eines EDV-unterstützten Verfahrens zur Bestimmung von geeigneten Instandhaltungsstrategien. Schlussbericht zum AIF-Forschungsvorhaben Nr. 8349. Aachen: Forschungsinst. für Rationalisierung an der RWTH Aachen,
- [Bec05] Beck, Katja (2005): Methodik zur Gestaltung eines migrationsfähigen Systemdesigns am Beispiel der Zugbeeinflussung. Diplomarbeit am Institut für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung (unveröffentlicht).
- [Bec08] Beck, Katja (2008): Wirtschaftlichkeitsbewertungen des Eisenbahnbetriebes mit Hilfe von Betriebssimulationen. In: Ostermann, Norbert (Hg.): 6. Wiener Eisenbahnkolloquium. Kostenoptimierung im Schienenverkehr. Wien: Eigenverlag des Österreichischen Verbandes für Elektrotechnik , S. 43–48.
- [BJL07] Beck, Katja; Jäger, Bärbel; Lemmer, Karsten (2007): Optimisation of point life cycle costs through load-dependent maintenance. In: Forde, M. C. (Hg.): Railway Engineering 2007. Edinburgh: Engineering Technics Press Edinburgh .
- [BRJ08] Beck, Katja; Rapp, Thomas; Jäger, Bärbel (2008): LCC – Ausgangspunkt für Kostensenkungen in der Eisenbahnsignaltechnik. In: Signal & Draht, Jg. 100, H. 5, S. 20–24.
- [BSJ07] Beck, Katja; Scheier, Benedikt; Jäger, Bärbel (2007): Evaluation of economic efficiency of rail operation through simulation. In: Hansen, I. A.; Radtke, A.; Pahl, J. P.; Wendler, E. (Hg.): RailHannover 2007. 2nd International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. Hannover .
- [BSJ08] Beck, Katja; Scheier, Benedikt; Jäger, Bärbel (2008): RAILONOMICS - Determining Investment Strategies for Railway Signalling through Simulation. In: Allan, J.; Arias, E.; Brebbia, C. A.; Goodman, C. J.; Rumsey, A. F.; Sciutto, G.; Tomii, N. (Hg.): Computer System Design and Operation in the Railway and other Transit Systems, Computers in railways, XI: WIT Press , S. 65–74.

- [Bei93] Beichelt, Frank (1993): Zuverlässigkeits- und Instandhaltungstheorie. Stuttgart: Teubner.
- [BH86] Berg, Günter; Henker, Horst (1986): Weichen. 2. Aufl. Berlin: Transpress, Verlag für Verkehrswesen.
- [BL04] Bertsche, B.; Lechner, Gisbert (2004): Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau : Ermittlung von Bauteil- und Systemzuverlässigkeiten. 3. Aufl. Berlin [u. a.]: Springer.
- [BS02] Bikker, Gert; Schroeder, Martin (2002): Methodische Anforderungsanalyse und automatisierter Entwurf sicherheitsrelevanter Eisenbahnleitsysteme mit kooperierenden Werkzeugen. Düsseldorf: VDI Verlag
- [Bir07] Birolini, Alessandro (2007): Reliability engineering : theory and practice ; with 60 tables, 120 examples, and 50 problems. Berlin [u. a.]: Springer.
- [Bla08] Blanchard, Benjamin S. (2008): System engineering management. 4. Aufl. Hoboken, NJ: Wiley.
- [BLS06] Blohm, Hans; Lüder, Klaus; Schaefer, Christina (2006): Investition: Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung. 9. Aufl. München: Vahlen.
- [BBK+08] Böhm, Thomas; Beck, Katja; Knaak, Ann-Kristin; Jäger, Bärbel (2008): Efficient maintenance strategy through System Dynamics. In: Allan, J.; Arias, E.; Brebbia, C. A.; Goodman, C. J.; Rumsey, A. F.; Sciutto, G.; Tomii, N. (Hg.): Computer System Design and Operation in the Railway and other Transit Systems, Computers in railways, XI: WIT Press , S. 755–764.
- [Bor06] Bormet, Jörg (2006): Anforderungen des Betreibers an den Life-cycle. 6. Internationaler Signal & Draht Kongress. Innovationen und Veralterung in der Fahrweg-sicherungstechnik. Fulda
- [Bor07] Bormet, Jörg (2007): Anforderungen des Betreibers an den Life-cycle in der Fahrwegsicherungstechnik. In: Signal & Draht, Jg. 99, H. 1+2, S. 6–16.
- [Brü99] Brüggemann, Holger (1999): Evolutionäres Management von Produktionsanlagen. Aachen: Shaker.
- [Bus09] Busemann, Andreas (2009): Die beste Technik für das beste Netz. In: Deine Bahn, H. 3, S. 2-7
- [CFG07] Coenenberg, Adolf G.; Fischer, Thomas M.; Günther, Thomas (2007): Kostenrechnung und Kostenanalyse. Stuttgart: Schäffer-Poeschel (6).
- [Dau02] Daum, Bernd (2002): Lifecycle-integrierte Produktentwicklungsumgebung. Aachen: Shaker.

- [DB08] DB AG (2008): Wettbewerbsbericht 2008.
- [DB02a] DB Netz AG (2002): Konzernrichtlinie 405 - Fahrwegkapazität.
- [DB02b] DB Netz AG (2002): Konzernrichtlinie 413 - Infrastruktur gestalten.
- [DB06a] DB Netz AG (2006): Konzernrichtlinie 408 - Züge fahren und rangieren.
- [DB06b] DB Netz AG (2006): Konzernrichtlinie 892 - LST-Anlagen montieren und instandhalten.
- [DB06c] DB Netz AG (2006): Mobile Lösungen zur Unterstützung der Instandhaltung bei Schieneninfrastrukturdienstleistern: e-main. Förderkennzeichen BMBF 19G2063A und 19G4014. Frankfurt am Main.
- [DIN90] DIN 40041, 1990-12: Begriffe der Zuverlässigkeit.
- [DIN01] DIN EN 13306, 2001-09: Begriffe der Instandhaltung.
- [DIN03] DIN 31051, 2003-06: Grundlagen der Instandhaltung.
- [DIN05] DIN EN 60300-3-3, 2005-03: Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-3: Anwendungsleitfaden - Lebenszykluskosten (IEC 60300-3-3:2004).
- [DIN08] DIN IEC 61709, 2008-08: Bauelemente der Elektronik - Zuverlässigkeit - Referenzbedingungen für Ausfallraten und Beanspruchungsmodelle zur Umrechnung.
- [ED07] Egiste, Ömer; Delalic, Haris (2007): Vergleich von Entscheidungsunterstützungsverfahren. DLR e.V. Institut für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung (Studienarbeit).
- [Eng86] Engelmann, Hans (1986): Modell zur Quantifizierung und Bewertung von Betriebserschwernissen am Beispiel der Durcharbeitung von Gleisen. Hannover.
- [Eng03] Engels-Lindemann, Marcus (2003): Optimierung von Programm- und Budgetentscheidungen der betrieblichen Instandhaltung. Heimsheim: Jost-Jetter Verl.
- [Eur01] Europäische Kommission (2001): Die europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellungen für die Zukunft: Weissbuch. Luxemburg: Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften.
- [Fen07] Fendrich, Lothar (Hg.) (2007): Handbuch Eisenbahninfrastruktur. Berlin: Springer.
- [FKH03] Fengler, Wolfgang; Klahn, Volker; Haslinger, Alfred (2003): Kennzahlen zur Bewertung von Infrastruktur und Betrieb. In: Eisenbahningenieur, Jg. 54, H. 10, S. 56–61.

- [FNT03] Fenner, Wolfgang; Naumann, Peter; Trinckauf, Jochen (2003): Bahnsicherungstechnik : Steuern, Sichern und Überwachen von Fahrwegen und Fahrgeschwindigkeiten im Schienenverkehr. 2. Aufl. Erlangen: Publicis Corporate Publ.
- [Fis90] Fischer, Klaus (1990): Verkehrssicherungstechnik. Zuverlässigkeits- und Instandhaltungstheorie. 2. Aufl. Berlin: Transpress.
- [For69] Forrester, Jay W. (1969): Industrial dynamics. Cambridge: M.I.T. Press.
- [Fri09] Friedrich, Nicole (2009): Instandhaltung bei der DB Netz AG. In: Deine Bahn, H. 1, S. 20-23
- [Fri04] Fritz, Peter (2004): Effiziente Diagnose zur Verbesserung der Weichen- und Streckenverfügbarkeit. In: Signal & Draht, Jg. 96, H. 11, S. 24–27.
- [Für92] Fürnrohr, Michael (1992): Stochastische Modelle zur Prognose von Lebenszykluskosten komplexer Systeme. München.
- [Gut08] Gutsche, Katja (24.09.2008): Erfahrungen mit dem Einsatz von Weichendiagnosesystemen. Interview mit Woicke, Torsten (DB Netz AG). Am 24.09.2008 in Berlin.
- [Gut09a] Gutsche, Katja (2009): Verfahren zur Ermittlung von Wartungsinformationen, Patentanmeldung: gestellt durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
- [Gut09b] Gutsche, Katja (2009): Intelligent, cost-efficient maintenance of railway switches based on condition data. In: Arnaiz, A.; Aranzabe, A.; Rao, R. (Hg): 22nd International Congress Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management: Fundacion Tekniker, S. 289-294.
- [Had00] Haderer, Thorsten (Hg.) (2000): Gabler-Wirtschaftslexikon. 15. Aufl. Wiesbaden: Gabler.
- [Ham06] Hamprecht, Andreas (2006): Service Level Management: ergebnisorientierte Bewirtschaftung am Beispiel von Anlagen des spurgebundenen Verkehrs. Düsseldorf: VDI-Verlag
- [Har95] Haram, Mohamed Abdulla El (1995): Integrated approach to condition-based reliability assessment and maintenance planning. Exeter.
- [Hei00] Heimerl, Gerhard (2000): Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des ÖPNV und Folgekostenrechnung. München.
- [Hem06] Hempe, Thomas (2006): Ein LCC-basiertes Verfahren zur Evaluierung von Schleifstrategien für Schienenbahnen. Hamburg: Tetzlaff-Hestra.

- [HT07] Hentzschel, Jürgen; Trappmann, Frank (2007): Kostensenkung bei Bündelung von Instandhaltungsmaßnahmen. In: Eisenbahningenieur, H. 10, S. 7–11.
- [HK06] Hüper, Axel-Björn; Koriath, Holger (2006): Life-Cycle-Management für bauliche Anlagen der Deutschen Bahn AG. Kernaussagen und Standards. In: Eisenbahntechnische Rundschau, Jg. 55, H. 7+8, S. 485–488.
- [Hus07] Husen, Christian van (2007): Anforderungsanalyse für produktbegleitende Dienstleistungen. Heimsheim: Jost-Jetter-Verlag
- [Kal07] Kalyoncu, Sedef (2007): Die Bedeutung der Subventionspolitik und der aktuellen Fördermechanismen der Europäischen Union für die Migration des European Train Control Systems. DLR e.V. Institut für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung (Studienarbeit).
- [Kel97] Kelly, Anthony (1997): Maintenance strategy. Business-centred maintenance. Oxford [u.a.]: Butterworth-Heinemann Ltd.
- [Kru07] Kruschwitz, Lutz (2007): Investitionsrechnung. München: Oldenbourg (11).
- [KR01] Kynast, Peter; Röpke, Bernd (2001): Diskussion der Instandhaltungsgrenzwerte in der Leit- und Sicherungstechnik. In: Signal & Draht, Jg. 93, H. 1+2, S. 5–10.
- [Lei07] Leibbrand, Hans (2007): Europas Zukunft: Betriebsleitetechniken. In: Eisenbahntechnische Rundschau, Jg. 57, H. 11, S. 659.
- [Lev97] Levkow, Ivan (1997): Simulation des Oberbauverhaltens von Eisenbahnstrecken unter betrieblicher Belastung. Hannover: Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb
- [Lie07] Lienau, Cay (2007): Abbildung von Infrastrukturkosten in der Eisenbahnbetriebssimulation. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag.
- [LNG+06] Leenen, M.; Neumann, L.; Große, C.; Jacobs, M. (2006): Der deutsche Bahnmarkt – Marktanalyse 2006 bis 2011 : Akteure, Volumina und Prognosen. In: Eisenbahntechnische Rundschau, H. 09, S. 618-622.
- [Lor98] Lorenz, Manfred (1998): Stellwerkstechnik. Dresden: Lorenz.
- [Los96] Loss, Hans-Jürgen (1996): Optimierung von Instandhaltungsstrategien durch rechnerunterstützte Betriebsdatenanalyse und -verarbeitung. Düsseldorf: VDI-Verl.
- [LB06] Lüders, Carsten; Bacak, Sami (2006): Monitoring des Betriebs- und Störungsverhaltens von Schienenfahrzeugen. In: Eisenbahningenieur, Jg. 57, H. 11, S. 37–41.

- [Met77] Metzger, H. (1977): Planung und Bewertung von Arbeitssystemen in der Montage. Stuttgart, Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA).
- [Mit07] Mitchell, John S. (2007): Physical asset management handbook. Houston: Clarion Technical Publ.
- [Mül06] Müller, Andreas (01./02.02.2006): LCC bei der Deutschen Bahn AG. Veranstaltung vom 01./02.02.2006, aus der Reihe "Symposium Ansätze zur alternativen Finanzierung der Schieneninfrastruktur". Dresden.
- [NP04] Naumann, Peter; Pahl, Jörn (2004): Leit- und Sicherungstechnik im Bahnbetrieb: Fachlexikon. Hamburg: Tetzlaff-Hestra.
- [Nea95] Neale, Michael J. (1995): Component Failures, Maintenance and Repair. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd.
- [Obr09] Obrenovic, Miroslav (2009): Methodik für die Migration von Systemen der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik am Beispiel der Einführung von ETCS. Braunschweig: DLR e.V., Institut für Verkehrssystemtechnik
- [Pac04] Pahl, Jörn (2004): Systemtechnik des Schienenverkehrs: Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 4. Aufl. Stuttgart: Teubner.
- [Pac05] Pahl, Jörn (2005): Entwicklung der Leit- und Sicherungstechnik für das System Bahn. In: Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), Jg. 54, H. 3, S. 96–102.
- [PWH+01] Pätzold; Wittenberg; Heinrichs, et al. (Hg.) (2001): Kommentar zur Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO). 4. Aufl. Darmstadt: Hestra-Verlag.
- [PS07] Perridon, Louis; Steiner, Manfred (2007): Finanzwirtschaft der Unternehmung. 14. Aufl. München: Vahlen.
- [PMS+91] Pfeiffer, W.; Metze, G.; Schneider, W.; Amler, R. (1991): Technologie-Portfolio zum Management strategischer Zukunftsgeschäftsfelder. 6. Aufl. Göttingen: Vandenhoeck und Ruprecht.
- [PB00] Pomerol, Jean-Charles; Barba-Romero Casillas, Sergio (2000): Multicriterion decision in management : principles and practice. Boston [u.a.]: Kluwer Acad. Publ.
- [Pör07] Pörner, Ronald (2007): Anschluss finden - Europas Anstrengungen für die Einheit auf der Schiene. In: ZEVrail Glasers Annalen, Jg. 131, H. 6+7, S. 239–245.
- [Pre96] Preuß, Erich (1996): Stellwerke deutscher Eisenbahnen -Technik und Bauwerk. Stuttgart: Transpress-Verl.-Ges.

- [Pro02] Proksch, Rüdiger (2002): Modellbasierte Planung und Bewertung von Instandhaltungsstrategien am Beispiel einer Serienfertigung mit geringer Variantenzahl. Heimsheim: Jost-Jetter Verl.
- [Rad06] Radtke, Alfons (2006): EDV-Verfahren zur Modellierung des Eisenbahnbetriebs. Hamburg: Eurailpress.
- [Rai04] Rail Management Consultants GmbH (2004): RailSys Version 3.0, Produktbeschreibung. Hannover.
- [Rai06] Rail Management Consultants GmbH (2006): Benutzerhandbuch RailSys Version 4.0. Hannover.
- [RH04] Rausand, Marvin; Høyland, Arnljot (2004): System reliability theory: models, statistical methods, and applications. 2. Aufl. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
- [RB03] Redeker, Frank Robert; Brugman, Dionijs Emil (2003): Ferndiagnose von Eisenbahnobjekten. In: Eisenbahningenieur, Jg. 54, H. 03, S. 16–20.
- [Rie96] Riezler, Stephan (1996): Lebenszyklusrechnung: Instrument des Controlling strategischer Projekte. Wiesbaden: Gabler.
- [Rud08] Rudloff, Saskia (2008): Entwicklung von Simulationsmodellen zur Bestimmung und Bewertung von Instandhaltungsstrategien im Bereich Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik. DLR e.V. Institut für Verkehrssystemtechnik (Diplomarbeit).
- [Saa97] Saatweber, Jutta (1997): Kundenorientierung durch Quality Function Deployment : systematisches Entwickeln von Produkten und Dienstleistungen. München [u.a.]: Hanser
- [Saa94] Saaty, Thomas L. (1994): Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process. 1. Aufl. Pittsburgh, PA: RWS Publications.
- [Sch06] Scheppan, Michael (2006): Der Zugleitbetrieb - das Betriebsverfahren für einfache betriebliche Verhältnisse. In: Deine Bahn, H. 12, S. 54–59.
- [Sch07a] Scheppan, Michael (2007): Der Zugleitbetrieb - das Betriebsverfahren für einfache betriebliche Verhältnisse. In: Deine Bahn, H. 1, S. 49–53.
- [Sch07b] Scheppan, Michael (2007): Der Zugleitbetrieb - das Betriebsverfahren für einfache betriebliche Verhältnisse. In: Deine Bahn, H. 2, S. 51–57.
- [Sch05] Schild, Ulrich (2005): Lebenszyklusrechnung und lebenszyklusbezogenes Zielkostenmanagement. Stellung im internen Rechnungswesen, Rechnungsausgestaltung und modellgestützte Optimierung der intertemporalen Kostenstruktur. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl.

- [SL03] Schilling, Rosemarie; Lücking, Lars (2003): Senkung der Lebenszykluskosten. Standardisierung von Instandhaltungs- und Umbaumaßnahmen am Beispiel der Weichen. In: Eisenbahningenieur, Jg. 54, H. 5, S. 58–72.
- [SSK92] Schmidt, D.; Schroeder-Baumgart, R.; Kurzrock, G. (1992): Darstellung der Ursache/Wirkung-Beziehungen verschiedener Oberbau-Instandhaltungsstrategien mit Hilfe von System Dynamics-Modellen : Abschlussbericht. Stuttgart: BWI.
- [Sch92] Schmidt, Dieter (1992): Strategisches Management komplexer Systeme. Die Potentiale computergestützter Simulationsmodelle als Instrumente eines ganzheitlichen Managements - dargestellt am Beispiel der Planung und Gestaltung komplexer Instandhaltungssysteme. Frankfurt am Main [u.a.]: Lang.
- [Sch98] Schmidt, Rolf Paul Robert (1998): Beitrag zur Instandhaltungs-Strategie von Schienenfahrzeugen. Aachen.
- [Sch09] Schmidt, Frank (2009): Moderne Schaltstellen in Regionalnetzen. In: Deine Bahn, H. 3, S. 24-29
- [Sch91] Schneeweiß, Christoph (1991): Planung. Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen. Berlin [u.a.]: Springer.
- [Sch93] Schroeder-Baumgart, Reinhart (1997): Verhaltensprognose und Nutzen-Kosten-Analyse für die Oberbauinstandhaltung von Schienenbahnen. Hannover: Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb
- [SS07] Schütte, Jörg; Scholz, Sven (2007): Alterungscharakteristik und Betriebsqualität in der Leit- und Sicherungstechnik. In: Signal & Draht, Jg. 99, H. 05, S. 7–12.
- [Sei01] Seicht, Gerhard (2001): Investition und Finanzierung. 10. Aufl. Wien: Linde.
- [Sie98a] Siemens (1998): Weichendiagnosesystem SIDIS W. Technik für effizienten Bahnbetrieb. Werksschrift: Verkehrstechnik Braunschweig (Bestell-Nr. A19100-V100-B795-V1).
- [Sie98b] Siemens (1998): Weichendiagnosesystem SIDIS W. Bedienungsanleitung: Siemens AG.
- [Sie08] Siemens (2008): Weichenantrieb S 700 K. Weichen zuverlässig stellen. Werkschrift: Verkehrstechnik Braunschweig (Bestell-Nr. A19100-V100-B802-V1).
- [Sta01] Stalder, Oskar (2001): Die Kosten des Fahrweges im internationalen Vergleich - ein Projekt der UIC. In: Eisenbahningenieur, Jg. 52, H. 2, S. 5–15.
- [Ste00] Stermann, John D. (2000): Business dynamics : systems thinking and modeling for a complex world. Boston [u. a.]: Irwin/McGraw-Hill.

- [Sto02] Stoll, Horst; Bollrath, Bernhard (2002): Weichendiagnosesystem SIDIS W. In: Signal & Draht, Jg. 94, H. 4, S. 26–29.
- [Stu96] Sturm, A. (1996): Zustandswissen für Betriebsführung und Instandhaltung. Essen: Verlag VGB-Kraftwerkstechnik.
- [Tro06] Trost, Dirk Gunther (2006): Zehn Jahre Regionalisierung des SPNVs. Eine Bilanz. In: Internationales Verkehrswesen, Jg. 58, H. 10, S. 450–456.
- [UIC02a] UIC (2002): EcoSwitch. Results of the UIC Feasibility Study on a Switches & Crossings Management System.
- [UIC02b] UIC (2002): InfraCost - The Cost of Railway Infrastructure. Final Report: UIC Infrastructure Commission.
- [UIC04] UIC (2004): ETCS migration strategies on corridors and at national level - Cost/Benefit analysis. Paris.
- [Vei99] Veit, Peter Walter (1999): Rechenmodell zur wirtschaftlichen Bewertung von Strategien im Bereich Fahrweg. TU Graz.
- [Vei00] Veit, Peter Walter (2000): Wirtschaftliche Bewertung von Strategien im Bereich Fahrweg. In: Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), Jg. 49, H. 5, S. 313–318.
- [VDI96] VDI 3633, 1996-11: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Begriffsdefinitionen.
- [VDI99] VDI 2888, 1999-12: Zustandsorientierte Instandhaltung.
- [VDI00] VDI/ VDE 3542, 2000-10: Sicherheitstechnische Begriffe für Automatisierungssysteme – Qualitative Begriffe
- [VDI05] VDI 2884, 2005-12: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC).
- [VDV04] VDV-Schrift 752, 03/2004: Empfehlungen zur Auswahl geeigneter Betriebsverfahren für eingleisige Eisenbahnstrecken.
- [Vol03] Vollstedt, Thorsten (2003): Simulationsunterstützte Personalstrukturplanung auf Basis eines abnutzungsorientierten Instandhaltungskonzeptes. Aachen: Shaker.
- [Wal94] Walther, Johann Christoph (1994): Verkehrssimulationen in Transport- und Kommunikationsnetzen als Basis für Investitionsstrategien. Karlsruhe.
- [War81] Warnecke, H. J. (Hg.) (1981): Instandhaltung. Grundlagen. Köln.
- [WW01] Wiegand, Bodo; Wirtz, Helmut (2001): Modulare Instandhaltung – neues Konzept revolutioniert die Instandhaltung im Bahnbetrieb. In: Eisenbahningenieur, Jg. 52, H. 8, S. 46–49.

- [WDD94] Williams, John H.; Davies, Alan; Drake, Paul R. (1994): Condition-based maintenance and machine diagnostics. London [u.a.]: Chapman & Hall.
- [Wil02] Wilson, Alan (2002): Asset maintenance management. A guide to developing strategy & improving performance. 1st ed. New York: Industrial Press.
- [Wüb84] Wübbenhorst, Klaus L. (1984): Konzept der Lebenszykluskosten: Grundlagen, Problemstellungen und technologische Zusammenhänge. Darmstadt: Verlag für Fachliteratur.
- [Zan76] Zangemeister, Christof (1976): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik: eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. 4. Aufl. München: Wittemann.
- [Zan00] Zangemeister, Christof (2000): Erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse (EWA): Grundlagen, Leitfaden und PC-gestützte Arbeitshilfen für ein "3-Stufen-Verfahren" zur Arbeitssystembewertung. 2. Aufl. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss.
- [Zim02] Zimmer, Christoph (2002): Konzeptioneller Neuansatz für den Betrieb von Nebenstrecken. In: Eisenbahningenieur, Jg. 53, H. 12, S. 44–51.
- [ZG91] Zimmermann, Hans-Jürgen; Gutsche, Lothar (1991): Multi-Criteria-Analyse: Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen. Berlin [u.a.]: Springer.
- [Zsc06] Zschoche, Frank (2006): Der Zwang zur Automatisierung für einen wirtschaftlichen Betrieb. In: DVV Media Group GmbH Eurailpress (Hg.): 6. Signal & Draht Kongress. Fulda .
- [Zwa07] Zwanenburg, W.-J (2007): The Swiss experience on the wear of railway switches & crossings: Swiss Transport Research Conference. Monte Verità/ Ascona CH .
- [Zwa09] Zwanenburg, W.-J. (2009): Modelling degradation processes of switches & crossings for maintenance & renewal planning on the Swiss railway network. Saarbrücken: Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften.

